

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-279889

(P2003-279889A)

(43) 公開日 平成15年10月2日 (2003.10.2)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード <sup>*</sup> (参考)
G 0 2 B 27/18		G 0 2 B 27/18	Z 2 K 1 0 3
G 0 3 B 21/00		G 0 3 B 21/00	D

審査請求 未請求 請求項の数 1 O L 外国語出願 (全 63 頁)

(21) 出願番号 特願2003-7205(P2003-7205)  
 (22) 出願日 平成15年1月15日 (2003.1.15)  
 (31) 優先権主張番号 10/050003  
 (32) 優先日 平成14年1月15日 (2002.1.15)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 590000846  
 イーストマン コダック カンパニー  
 アメリカ合衆国, ニューヨーク14650, ロ  
 チェスター, ステイト ストリート343  
 (72) 発明者 アンドリュー・エフ・カーツ  
 アメリカ合衆国14610ニューヨーク州ロチ  
 エスター, キャサウェイ・パーク93番  
 (72) 発明者 ブライアン・イー・クルシュウィッツ  
 アメリカ合衆国14620ニューヨーク州ロチ  
 エスター, ロシター・ロード47番  
 (74) 代理人 100062144  
 弁理士 青山 稔 (外2名)

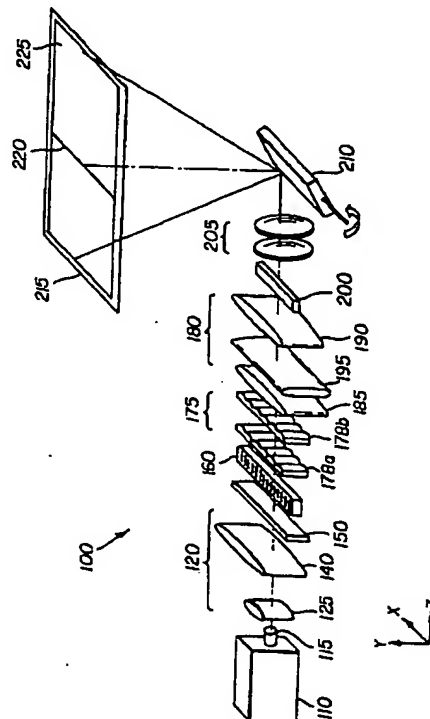
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ投影ディスプレイシステム

## (57) 【要約】

【課題】 スペックルを低下させ、空間光変調器におけるコヒーレンスのアーチファクトを除去する一方で、高いスループット効率を有する、レーザディスプレイシステムを提供する。

【解決手段】 ディスプレイ装置は、コヒーレンス長を有する光ビームを放射するレーザ光源と、上記光ビームを拡大するビーム拡大器と、空間光変調器と、上記拡大されたレーザビームを整形して上記空間光変調器の均一な照射を供給するビーム整形光学装置とを含み、上記ビーム整形光学装置は、複数のレンズレットにてなるアレーを有するフライズ・アイ・インテグレータを含み、上記光ビームにおいて上記レーザ光源と上記ビーム整形光学装置との間に配置されたディフューザと、上記光ビームの時間的及び空間的な位相を変化させる電氣的に制御可能なスペックル除去変調器と、遠隔のスクリーン上に上記空間光変調器の画像を生成する投影レンズとを含む。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 a) コヒーレンス長を有する光ビームを放射するレーザ光源と、  
 b) 上記光ビームを拡大するビーム拡大器と、  
 c) 空間光変調器と、  
 d) 上記拡大されたレーザビームを整形して上記空間光変調器の均一な照射を供給するビーム整形光学装置とを備え、上記ビーム整形光学装置は、複数のレンズレットにてなるアレーを有するフライズ・アイ・インテグレータを含み、  
 e) 上記光ビームにおいて上記レーザ光源と上記ビーム整形光学装置との間に配置されたディフューザと、  
 f) 上記光ビームの時間的及び空間的な位相を変化させる電氣的に制御可能なスペックル除去変調器と、  
 g) 遠隔のスクリーン上に上記空間光変調器の画像を生成する投影レンズとを備えたディスプレイ装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、レーザを光源として用いた投影ディスプレイ装置に関する。特に、本発明は、ディスプレイにおけるコヒーレンスに誘発されたアーチファクト及びスペックルの発現を低減するための手段を有するレーザ投影ディスプレイ装置に関する。

## 【0002】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】 ビデオ画像の表示のための投影ディスプレイシステムは、従来技術において公知である。これらのシステムは、表示スクリーン上に投影される所望の画像を形成するために、適当な光フィルタリングを備えた1つ以上の光バルブ又は空間光変調器に光を照射する白色光源の形式、最も有名なものはキセノンアークランプの形式をとることが可能である。

【0003】 レーザは、投影ディスプレイのための、アークランプに代わる魅力的な代替の光源として知られている。1つの潜在的な利点は、非常に飽和した色を特色とする、より広い色の範囲にある。レーザ照射は、何らかの空間光変調器と組み合わせられたときに改善された効率とより強いコントラストとを提供する、簡単で低コストの効率的な光学システムに対する可能性をもたらす。投影ディスプレイに係るレーザの1つの不都合な点は、可視波長において十分なパワーを有する費用効果の高いレーザ源が、歴史的に欠如していることにある。しかしながら、そのようなレーザは（未だに高コストであるとしても）、現在、イエノプティク（JenOptik）及びルメラ・レーザ・ゲゼルシャフト・ミット・ベシュレンクテル・ハフツング（Lumera Laser, GmbH）によって製造され、当該レーザは、赤と緑と青の光を同時に発生する光パラメトリック発振器（OPO）を特色とする非線形光学システムをそれぞれ備えた、モードロック型ダイオード励起固体レーザである。このシステムは、1998年

10月27日に発行された特許文献1と2001年5月15日に発行された特許文献2においてワレンスタイン（Wallenstein）によって開示され、2001年5月15日に発行された特許文献3においてネイベル（Nebe I）によって開示されている。1998年4月14日に発行された特許文献4においてモウルトン（Moulton）によって開示されたもう1つの例は、Q-ピーク（Q-Peak）によって開発され、赤と緑と青の光を同時に発生するOPOシステムを備えた、QスイッチドDPSSレーザ（Q-switched DPSS Laser）である。

【0004】 空間光変調器は、レーザディスプレイシステムを可能にするもう1つの構成要素を提供する。2次元空間光変調器の例は、ジェーブイシー（JVC）、スリーファイブ（Three-Five）、オーロラ（Aurora）、及びフィリップス（Philips）から利用可能な液晶オンシリコン（LCOS）変調器のような反射型液晶変調器と、テキサス・インスツルメンツ（Texas Instruments）から利用可能なデジタル・ライト・プロセッシング（DLP）チップのようなマイクロミラー・アレーとである。1次元アレーとラスタースキャンされるシステムとに対する2次元変調器の利点は、必要な走査が存在しないことと、変調器アレーにおける不均一性に起因する縞状のアーチファクトが存在しないことと、フレームのリフレッシュレートよりも非常に高い周波数（ $>120\text{ Hz}$ ）でのレーザノイズに対する耐性とにある。2次元空間光変調器の別の利点は、照射するビームの空間的コヒーレンスの低下に対する広い許容性にある。一方、いくつかの価値ある変調器技術で、高いフィルファクタの1次元デバイスを容易に製造することができのに対して、2次元構成では非常に制限されている。1次元又はリニアの空間光変調器の例は、シリコン・ライト・マシーンズ（Silicon Light Machines）によって製造され、1994年5月10日にブルーム（Bloom）他に対して発行された特許文献5に記述されたグレーティング・ライト・バルブ（GLV）と、2001年10月23日にコヴァーツ（Kowarz）に対して発行された特許文献6に記述された共焦点グレーティング変調器と、2000年7月4日にラマヌジャン（Ramanujan）他に対して発行された特許文献7に記述された電気光学反射グレーティング変調器とを含む。

【0005】 高いパワーの可視のレーザは、投影システムの設計のために、拡張された光の範囲と簡単化された光学設計との可能性を含む新たな機会を提供するが、レーザ光は、他の点では、空間光変調器を備えた画像投影システムに用いるためには最適ではない。特に、レーザは、非常に小さな光学的な量（optical volume）（エタンドュ（etendue）又はラグランジュ（lagrange））内で一般的にコヒーレントな光を放出する、非常に明るい光源である。エタンドュは、焦点のスポットの面積と、焦点におけるビームの立体角との積である。ラグランジ

ユは、焦点のスポットの半径と開口数との積である。例えば、回折限界ビームを用いた単一モードの緑の波長のレーザは約 $0.3\mu\text{m}$ のラグランジュを有し、これは、アークランプのような従来型の白色光ランプの光源に対するラグランジュよりも約15000倍だけ小さい。そのような小さなラグランジュを備えたことによって、レーザは、厳密に制御されたビームが望ましいフライングスポットプリンタやレーザ光線ショーのためのものを含む、ラスタ走査システムにおいて非常に効果的に使用可能である。

【0006】一方、フィルム又は空間光変調器のような画像生成媒体の画像がスクリーン又は目標平面に対して結像される画像投影システムにおいて、レーザの高いコヒーレンスと小さなラグランジュとは根本的に望ましくない。そのような画像生成システムにおいて、ラグランジュは、集光レンズの開口数を乗算された、投影される領域の直線サイズ (linear size) (空間光変調器のサイズ) によって決定される。関連した量であるエタンドュも同様に計算される。多くの白色光投影システムにおいて、投影レンズは、可能なかぎり多くの光を集光するように、かなりの大口径 (fast) (例えば  $f/3$ ) である。たとえそうであっても、典型的な白色光ランプの光源は、光バルブと投影レンズの両方でオーバーフィル (すなわち、光の量があふれ)、かなりの量の光が失われる。例えば、一般的な $0.9"$ の対角光バルブと $f/3$ の投影レンズとを用いた代表的システムにおいて、最適な光源は、オーバーフィルすることのない適正な充填を提供するような、ほぼ $2.0\text{mm}$ のラグランジュを有している。しかしながら、 $2$ 乃至 $10\text{mm}$ の典型的なラグランジュを備えた標準的な白色光ランプは十分に明るくはなく、一般に、この代表的システムでオーバーフィルしてしまう。

【0007】(ラスタスキャンニングに対比して) 画像領域の投影を用いたレーザディスプレイシステムの場合には、レーザが明るすぎるという、逆の問題が生じる。さらに、表示される画像に重なることがある縞のような、干渉の効果に対する潜在的な可能性が存在するので、コヒーレントな光源で空間光変調器を照射することは望ましくない。液晶パネルのグリッド電極パターン、中心に不連続な部分を備えたXキューブ、あるいは光学素子上の任意のごみ又は欠陥を、高度にコヒーレントな光のビームで照射することによって、回折のアーチファクトが発生しうる。ゆえに、そのようなレーザ投影システムに対しては、光源の明るさを低下させること (又は光源のラグランジュを増大させること) が必要である。

【0008】光源の明るさに係る画成された低下はまた、重要な機会を提供する。投影ディスプレイの光学システムは、解像度とシステムの光効率とシステムの簡単さに係るシステムの必要条件を最適化し、かつバランスさせるように設計されることが可能である。システムの

$f$  数をシステムの光効率以外の基準に基づいて画成することによって、投影レンズ、カラーフィルタ、偏光光学装置のような他のシステム構成要素についての仕様を緩和し、何らかのランプに基づく投影システムと比較してシステムのコストを劇的に低下させることができる。

【0009】レーザ光源は、投影ディスプレイの照射及び画像生成システムにおける使用のために最適化可能である一方で、結果として、対処されるべきスペックルに係る大きな不利益が存在する。スペックルは、ほとんどのレーザ光源に固有の (空間的及び時間的の両方の) 高度なコヒーレンスに起因して発生する。スペックルは画像中のノイズ成分を生じ、それは、画像の実際の鮮明さを低下させかつ見る人の邪魔になる粒状構造として現われる。このように、スペックルの問題は、適当なレーザ光源が歴史的に欠如していたことと同様に、市場性のあるレーザに基づいたディスプレイシステムの開発を阻んできた。

【0010】スペックルを減少させることを試みる方法において、従来技術は豊富に存在している。1つの一般的なアプローチは、レーザ光源の線幅を広げることによって時間的なコヒーレンスを低下させることである。時間的なコヒーレンスを低下させることに対する他のアプローチは、照射する波面を複数のビームレット (beamlet; 又は小ビーム) に分割し、それらをレーザのコヒーレンス時間よりも長い時間で互いに遅延させることである。例えば、1993年6月29日にラスムセン (Rasmussen) 他に対して発行された特許文献8を参照せよ。スクリーンを振動させるか又は動的に変更させることによってスペックルのパターンを動的に変化させることは、スペックルのパターンの視認性を低下させるもう1つの方法である。例えば、1993年12月21日にトンプソン (Thompson) 他に対して発行された特許文献9を参照せよ。もう1つのスペックルを低下させるためのアプローチは、1971年6月28日にマシセン (Mathisen) に対して発行された特許文献10に記載されたように、レーザ光をマルチモード光ファイバに結合してファイバを振動させることで、モードスクランブルを発生させることを含む。

【0011】スペックルを除去する解決法に係るもう1つの族は、投影システムの内部で動かされるか振動させられる散乱素子を用いている。典型的には、これは、1977年7月12日にローソン (Rawson) に対して発行された特許文献11に開示されているように、中間の画像平面において実行される。このアプローチの1つの欠点は、散乱が正確に画像平面において生じなければならず、そうでないと画像の軟化が生じるということにある。また、投影レンズは、中間の画像平面を提供するという必要条件によって複雑化する。装置の照射経路においてレーザビームを動的に散乱することによってスペックルのパターンを動的に変化させる手段が好ましいであ

ろう。このアプローチを利用したホログラフ照射システムが、1970年1月20日に発行された特許文献12においてヴァンリグテン (vanLigten) によって開示され、これにおいては、ディフューザがビーム拡大器 (beam expander) の焦点において回転される。フローレンス (Florence) は、1994年5月17日に発行された特許文献13において、回転するディフューザを介して光バルブを照射することを開示している。これらのアプローチは、矩形の空間光変調器に係る均一に有効な照射に対して適用可能でないという不利益を有する。バターワース (Butterworth) 他は、1999年12月21日に発行された特許文献14で、光導波路ホモジェナイザの照射において、可変な厚さを有するプレートが回転されるシステムを開示している。しかしながら、レーザとともに用いられたとき、光導波路ホモジェナイザは、十分な均一性を達成するために大きな開口数又は十分な長さのいずれかを必要とし、かつ設計の自由度が少ないためにフライズ・アイ (fly's eye) の光学装置を用いて設計されたシステムほどは制御が効かない。ゆえに、コンパクトなシステムにおいて、均一な照射を生成すると同時に照射の明るさを制御することはより困難になる。

【0012】最後に、2001年11月27日に発行された特許文献15においてトリスナディ (Trisnadi) によって開示されたレーザ投影システムは、画像生成するビームにわたる構造化された位相プロファイルを送達するために波面位相変調器が使用される設計を説明している。画像データは、リニアGLV型の空間光変調器によってビームに伝達される。この変調器は、波面変調器が位置する中間の平面に対して結像され、次いで、この中間の画像はスクリーンに対して再び結像され、ここで、上記画像はガルバノメータの動きを介して全体的に走査される。このシステムは、波面変調器によって提供される静的な位相プロファイルが、狭い (走査の) 方向における線状画像に伝達されるという事実に基づいている。いかなる瞬間においても、スクリーン上の単一の点は、位相プロファイル上の単一の点によって照射される。スクリーン上の単一の点における合計の強度は、すべての位相の“非干渉性”の和である。さらに、波面変調器の位相プロファイルは、高低の位相ステップからの干渉の効果が一般に互いに相殺するようになっていなければならない。特許文献15のシステムは、ある程度のスペックルの低減をもたらすが、波面変調器が、照射システム内よりもむしろ画像生成システム内の中間の画像平面に配置されているという事実は、画像品質に実質的に影響しないという制約によって位相の変化が制限されているので、システムの性能を低下させる。また、前述の波面変調器は、受動的な空間的に可変の位相グレーティングとして構成された静的なデバイスであるので、それは能動的なデバイスよりも少ない制御と位相の変動とを提供し、従って、スペックルの低減は小さくなる可能性があ

る。

【0013】画像プロジェクト中でレーザを光源として用いることのもう1つの不利益は、干渉に対する感度と、光バルブにおける回折のアーチファクトの発生にある。このことは、フィルム層の非均一性に起因して薄膜構造が画像中の縞を結果的に発生させることがある液晶変調器において特にあてはまる。回折のアーチファクトは、光変調器におけるグリッド電極パターンを高度にコヒーレントな光のビームで照射することから生じる。

【0014】ゆえに、空間光変調器を使用し、照射の明るさを制御してシステムの設計を最適化することを可能にし、低減されたスペックルを提示し、空間光変調器におけるコヒーレンスのアーチファクトを除去する一方で、高いスループット効率を提示する、レーザに基づいたディスプレイシステムに対する必要性が存在する。

【0015】

【特許文献1】米国特許第5, 828, 424号の明細書。

【特許文献2】米国特許第6, 233, 025号の明細書。

【特許文献3】米国特許第6, 233, 089号の明細書。

【特許文献4】米国特許第5, 740, 190号の明細書。

【特許文献5】米国特許第5, 311, 360号の明細書。

【特許文献6】米国特許第6, 307, 663号の明細書。

【特許文献7】米国特許第6, 084, 626号の明細書。

【特許文献8】米国特許第5, 224, 200号の明細書。

【特許文献9】米国特許第5, 272, 473号の明細書。

【特許文献10】米国特許第3, 588, 217号の明細書。

【特許文献11】米国特許第4, 035, 068号の明細書。

【特許文献12】米国特許第3, 490, 827号の明細書。

【特許文献13】米国特許第5, 313, 479号の明細書。

【特許文献14】米国特許第6, 005, 722号の明細書。

【特許文献15】米国特許第6, 323, 984号の明細書。

【0016】

【課題を解決するための手段】この必要性は、本発明に従って、コヒーレンス長を有する光ビームを放射するレーザ光源と、上記光ビームを拡大するビーム拡大器と、

空間光変調器と、上記拡大されたレーザービームを整形して上記空間光変調器の均一な照射を供給するビーム整形光学装置とを備え、上記ビーム整形光学装置は、複数のレンズレットにてなるアレーを有するフライズ・アイ・インテグレータを含み、上記光ビームにおいて上記レーザー光源と上記ビーム整形光学装置との間に配置されたディフューザと、上記光ビームの時間的及び空間的な位相を変化させる電氣的に制御可能なスペックル除去 (de-speckling) 変調器と、遠隔のスクリーン上に上記空間光変調器の画像を生成する投影レンズとを備えたディスプレイ装置を提供することによって満たされる。

【0017】

【発明の実施の形態】図1の斜視図には、本発明の一実施形態に係るレーザーディスプレイシステム100が示され、上記レーザーディスプレイシステム100は、所望の波長のレーザービーム115を、連続式か又はパルス式のいずれかで放射するレーザー110を含んでいる。レーザー110は、例えば固体レーザー、ファイバレーザー又は半導体レーザーであることが可能である。レーザー110は好適には、光の赤外線パルスを放射するレーザー結晶 (例えば、Nd:YAG、Nd:YLF、Nd:YVO<sub>4</sub>又はYb:YAG) を含むダイオードレーザー励起の固体レーザーであって、レーザー結晶からの光の赤外線パルスを、光の赤と緑と青のパルスに変換する非線形光学装置 (典型的には光パラメトリック発振器 (OPPO)) を含む。レーザー110に適当なモードロック型RGBレーザーは、ルメラ・レーザー・ゲゼルシャフト・ミット・ベシュレンクテル・ハフツング及びイエノプティクで製造されている。他の適当なレーザーは、Q-ピークによって開発された、QスイッチドRGBレーザーである。簡単化のため、本レーザーディスプレイシステム100は1つの波長のみに関して説明されている。これらのレーザーは一般に、適度のレーザー線幅 (<1.5nm) と小さい光源のラグランジュ値 (<0.5μm) と適度に長いコヒーレンス長C<sub>L</sub> (0.1乃至10.0mm) とを有する、高品質の単一モードビームを発生する。図2aにおいて、レーザーディスプレイシステム100は、図1の斜視図では示しにくい設計に係るいくつかの態様を明らかにするように断面図で示されている。

【0018】ビーム拡大光学装置120はレーザービームを拡大して、ビーム整形光学装置170の開口部を充填するのに十分な公称の直径を有する平行化されたビーム145を生成する。光学の当業者には公知であるように、ビーム拡大光学装置120は、例えば無限焦点のレンズ対であることが可能である。それに代わって、例えば、3枚の素子の、ズーム式のカリレイ式又はケプラー式のビーム拡大器が使用可能である。無限焦点対のビーム拡大光学装置120は、発散レンズ125と、コリメートレンズ140とを備えている。発散レンズ125は単一のレンズであるか、又は顕微鏡の対物レンズのよう

な複合レンズであることが可能であり、光ビーム115を発散ビーム130に変換する。コリメートレンズ140は単一のレンズ又は複合レンズであることが可能であり、発散ビーム130を平行化されたビーム145に変換する。この平行化されたビーム145はディフューザ150及び電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160と相互作用し、次いでさらにビーム整形光学装置170によって変化させられる。

【0019】図1及び図2aのレーザーディスプレイシステムは、x方向に長くy方向に狭いリニア空間光変調器200を使用するので、ビーム拡大光学装置120及びビーム整形光学装置170はアナモルフィックに構成され、一般に、適正な配置の複数の円柱レンズを使用する。特に、典型的には、リニア空間光変調器200を、均一な、テレセントリックに入射する光の長く狭い線で投光照射 (flood illuminate) することが望ましい。例えば、照射する光ビームは、アレー (x) 方向へ25乃至75mmだけ延在する均一な光プロファイルを有する場合があるのに対して、アレーに交差する方向の狭い光は、典型的には均一又はガウス型のいずれかのビームプロファイルで、20乃至100μmの幅のみを照射する。図1の簡単化された場合のレーザーディスプレイシステムでは、リニア空間光変調器200上に光のビームを集光させる、又は光のビームの焦点を合わせる交差アレー光学装置が、簡単化のために単一のレンズの交差アレーコンデンサ195として示されている。

【0020】従って、図1のシステムにおいてレーザー投影ディスプレイがリニア空間光変調器200を使用する場合、ビーム拡大光学装置120はアレー方向のみに動作し、よってこれはアナモルフィックであり、リニア光バルブの方向 (x方向) にビームを拡大する。この場合は、ビーム整形光学装置180もアナモルフィック (円筒形の断面) であり、光のパワーはx方向に存在し、y方向においては (交差アレーコンデンサ195を除いて) 平面状である。ビーム整形光学装置180は、フライズ・アイ・インテグレータ175を含んでいる。フライズ・アイ・インテグレータ175は、リニア空間光変調器200の領域上に効率的かつ均一な照射を供給する。フライズ・アイ・インテグレータ175は、典型的には同一である第1のレンズレットアレー178aと第2のレンズレットアレー178bとを含んでいる。第1及び第2のレンズレットアレー178a及び178bは、1次元のパターンで配列された、円筒面を有する複数のレンズレットを含んでいる。第2のレンズレットアレー178bは、第1のレンズレットアレー178aからほぼ第1のレンズレットアレー178a上のレンズレットの焦点距離分の長さで離隔されているため、第1のレンズレットアレー178aにおける各レンズレットは第2のレンズレットアレー178bにおける対応するレンズレットへと光を集束させる。第1及び第2のレンズ

9 レットアレー178a及び178bは異なっているが所望の照射を供給するように整合された他の設計も可能である。

【0021】それに代わって、第1及び第2のレンズレットアレー178a及び178bは、ガラス又はプラスチックにてなる単一のブロックに統合化可能である。また、特に、小さい散乱角が使用される場合には、本発明は第2のレンズレットアレー178bを使用せずに達成可能である。

【0022】ビーム整形光学装置180はまた、フライズ・アイ・インテグレータ175の後に配置された、コンデンサレンズ185及び視野レンズ190を含んでいる。第2のレンズレットアレー178bは、コンデンサレンズ185と協働して第1のレンズレットアレー178aの複数のレンズレットを互いに重複する方式で結像させ、リニア空間光変調器200において所定範囲の均一な照射を供給する。視野レンズ190は、リニア空間光変調器200のテレセントリックな照射を供給することで、焦点ぼけ誤差に対するシステムの感度を低下させ、かつ照射の合計の開口数を最小化する。視野レンズ190は、公称で、照射画像の倍率が乗算されたレンズレットの焦点距離に等しい焦点距離を有している。視野レンズ190とコンデンサレンズ185との間隔も同様に、照射をテレセントリックにするために一般にコンデンサレンズ185の焦点距離に等しい必要がある。レンズレットアレー及びコンデンサレンズ185の焦点距離は、典型的には、光学機械的構造を相対的に容易に設計できるような、リニア空間光変調器200の付近の十分な動作距離を提供するように選択される。個別のレンズレットは、幅100 $\mu$ mほどの小さいものであるか、又は8mmまでの幅の大きさのものであってもよく、個別のレンズレットは典型的には幅1乃至5mmである。利用可能なレンズレットのサイズの範囲は、使用される製造技術に依存する。

【0023】リニア空間光変調器200は、任意の瞬間に、画像のうちの単一の線220を生成する。ガルバノメータミラー210、スピンするポリゴン、又は回転するプリズムのようなスキャナは、スクリーンにわたって画像の線を掃引し、スクリーン215上に2次元の領域画像225を形成する。図1及び図2aに示されたレーザディスプレイシステム100の場合、本システムは、投影レンズ205がガルバノメータミラー210に先行して配置された、ポスト対物 (post-objective) スキャナとして構成されている。一例として、仮にリニア空間光変調器200が40mmの長さの動作領域を有し、かつスクリーン215上の所望の画像サイズが幅30フィートであるとする、投影レンズ205は $\sim 230\times$ の倍率で動作することになる。

【0024】リニア空間光変調器200には、様々な異なる技術が使用可能である。図1及び図2aで極度に簡

単化して示されているように、このデバイスは、光を何らかの方法で変調することによって画像データを光ビーム中に符号化するトランスミッシブ変調器 (送信変調器) である。このデバイスは、例えば、入射光の偏光を画素毎の基準で回転させる、PLZTから作られた電気光学変調器アレーであることも可能である。この場合、偏光ビームスプリッティングプリズム (図示せず) は、光ビームの変調された部分と変調されていない部分とを分離するためにリニア空間光変調器200とガルバノメータミラー210との間のどこかに配置される。

10 それに代わって、リニア空間光変調器200は、1994年5月3日にグロス (Gross) に対して発行された米国特許第5,309,178号の明細書で議論されているデバイスとよく似たトランスミッシブ音響光学アレーデバイス (送信音響光学アレーデバイス) であってもよく、このデバイスは、位相プロファイルを画素毎の基準で入射ビームに伝達する。この場合は、空間フィルタ (図示せず) を投影レンズ205内部のフーリエ面に配置することによって、シュリーレン型の光学システムを構成することができる。また、1994年5月10日にブルーム他に対して発行された米国特許第5,311,360号の明細書 (特許文献5) に記述されたグレーティング・ライト・バルブ (GLV) と、2001年10月23日にコヴァーツに対して発行された米国特許第6,307,663号の明細書 (特許文献6) に記述された共焦点グレーティング変調器と、2000年7月4日にラマヌジャン他に対して発行された米国特許第6,084,626号の明細書 (特許文献7) に記述された電気光学グレーティングとのような、反射グレーティング変調器アレーを使用することもできる。これらの場合には、レーザ投影ディスプレイ100はまた、光ビームを変調器に向かって偏向させ、かつ反射されたビームをシステムへと戻すように変形される必要がある (図1及び図2aにはこのような変形は示されていないが、これらは光学システム設計の分野では一般的な技術の範囲内である)。

【0025】レーザ110とビーム整形光学装置180の間には、投影システムの結像の必要条件に適合するようにレーザ光の明るさ又はエタンデュを変更するためのディフューザ150が配置されている。リニア空間光変調器200を有する図1及び図2aのレーザディスプレイシステム100の場合、ディフューザ150もまた公称では1次元である。すなわちディフューザ150は、光バルブアレーの長手方向 (図面ではx方向) に沿ってのみ光を散乱させ、y方向のビームは公称では変更されないままにする。この1次元のディフューザ150は、ちょうど光バルブを有効に照射するのに十分なだけの散乱を生成し、画像にフレア光を導入するほどの散乱を生成することはない。例示的な1次元のディフューザは、MEMSオプティカル (MEMS Optical) から利用可能な回



折ライン発生器と、フィジカル・オプティクス・コーポレーション (Physical Optics Corp.) から利用可能な楕円ホログラフィックディフューザとを含む。

【0026】特に、ディフューザ150は、レーザ投影ディスプレイ100の照射光学システム内で、光源の明るさを低下させる（ラグランジュを増大する）ために使用されている。それに応じて、ディフューザの角度 $\theta_D$ 及びディフューザ150の位置は選択される。システムのラグランジュは、ディフューザ150上の照射ビームプロファイルの幅の半分と、ディフューザ150によって散乱される光の角度の半分との積によって決定される。所望のシステムのラグランジュは、特定される画像の解像度から推測されることが可能であり、画像の解像度はリニア空間光変調器200の解像度と投影レンズ205の結像特性とに依存する。比較として、典型的なランプに基づくプロジェクタでは、システムのラグランジュはシステムの光効率を最大化させる必要性によって決定される。その結果、レーザディスプレイの投影レンズは、 $f$ 数を、従来技術のランプに基づくシステムに必要な $f/3$ の代わりに、 $f/7$ 乃至 $f/15$ の範囲で有することが可能である。レンズの $f$ 数に対する実際の設計目標は、レンズの品質を決定するために指定される結像基準に依存する（例えば、レイリー又はスパローの結像基準が適用可能である）。

【0027】一例として、長さ40mmのリニア空間光変調器200と $f/10$ の投影レンズ205との組み合わせは、X方向に $\sim 1.0$ mmで、投影システムの目標ラグランジュを特定する。この例では、ディフューザ150は半分の角度 $\theta_D = 5.0^\circ$ を有することが可能であり、22mmの直径を有する平行化されたビームによって照射されるように照射システム内に配置されることが可能である。この例では、レーザ光のラグランジュは $\sim 0.3\mu\text{m}$ から $\sim 1.0$ mmにまで弱められ、介在する光学システムが適正な倍率及びレンズ構成を有するものと仮定すれば、リニア空間光変調器200にスペキュラ (specular) の $f/10$ ビームを供給することができ、従って、適正なディフューザ150の選択を介して、効果的なレーザ光源のラグランジュ又は明るさを光学システムの必要性に応じて画成することが可能であり、これにより、伝統的なランプに基づくシステムに比べてシステムの光効率を増大させ、光学的な設計を簡単化することができる。

【0028】ディフューザ150は実際にレーザ光のコヒーレンスのある程度は低減させるが、レーザ光は、出力されるビームにスペckルを与えるのに十分だけコヒーレントのままである。このスペckルがさらに低減されなければ、これは、リニア空間光変調器200及びスクリーン215の両方で、光の強度における望ましくないランダムな変動として存在することになる。しかしながら、主としてリニア空間光変調器200に均一な照

射を供給するフライズ・アイ・インテグレータ175はまた、スペckル除去及びアーチファクト除去に与えるディフューザ150の効果を増大させる。これは、ディフューザ150からの多数の寄与をリニア空間光変調器200上で重複させることによって、従ってスクリーン215上の画像において重複させることによって実現する。リニア空間光変調器200及びスクリーン215において結果的に生じる照射光内のスペckルは、フライズ・アイ・インテグレータ175をもたない同様のシステムに比べるとサイズ及び大きさの面では大幅に低減されるが、重大なアプリケーションではこのスペckルの残存量でも依然好ましくない場合がある。スクリーンに対する非常に高い倍率と、高いゲインのスクリーンと、人の視力の限界近くでスクリーンを見る観察者とが組み合わせられているときの投影ディスプレイは、そのような重大なアプリケーションに相当する。

【0029】本発明の主たる目的は、ピクセル化 (pixelate) された光学システムの出力のスペckルを除去するために内部手段の組み合わせを用いるレーザ投影ディスプレイを提供することにある。こうしたシステムにおけるスペckルは、隣接する画素又は画素のグループが、空間的にも、あるいは時間的にも、互いに完全には同位相ではない場合に低減されることが可能である。図5aには、複数の画素のグループにわたって伸長しかつスペckルを呈示する場合のある、局所的に均一な位相プロファイルが示されている。本発明は、図5aに示された位相プロファイルを光ビームの広がりによって変化させる手段（電氣的に制御可能なスペckル除去変調器160を含む）を使用することで、それは、図5bに示されたプロファイルにより精密に類似したものとなる。図5bはよりランダムな位相プロファイルを示し、ここでは、任意の与えられた瞬間において、x方向に沿った隣接領域が異なる位相プロファイルの光を受けている。また、例えば隣接する変調器部分 (modulator site) 間のクロストークから生じることがある、図5cに示されたような周期的又は準周期的なプロファイルをもたらす幾何学的形状もまた同様に効果的である。周期的又は準周期的な位相プロファイルはスペckルを低減させるが、こうした周期的位相構造によって他の望ましくないアーチファクトがもたらされる可能性がある。このため、本発明に係る好適な動作モードは、図5bに示されたような位相プロファイルを生成するものである。本発明のある好適な実施形態では、レーザ投影ディスプレイ100は、一連の変調器部分を有する、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器160を含み、上記一連の変調器部分は、局所化されたランダムな位相変化を入射光に提供するための制御信号を受信し、これにより、システムによって表示される画像におけるスペckルの視認性を低減させることを促進する。本光学システムにおける空間光変調器の画素と、電氣的に制御可能なスペ

クル除去変調器 160 の変調器部分との間に 1 対 1 の対応が存在する必要はないということに注意する必要がある。実際に、本光学システムはピクセル化されている必要はまったくなく、例えば、画像変調のためにフィルムのようなアナログ媒体を使用することも可能である。

【0030】本発明のレーザディスプレイ 100 に使用される電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、光ビーム内に十分な位相変動を提供するため、当該変調器が適切な光学システムと併せて使用されるとき、ビューワ又はビューイングシステムはスペックルが低減された画像を受け取る。複数の変調器部分を独立して電氣的にアドレス指定することにより、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 における各変調器部分は、隣接した変調器部分に関して、光ビームに位相遅延を導入することができる。各変調器部分（又は複数の変調器部分のグループ）には異なる電圧が印加されるか又は異なる継続時間の電圧が印加されるので、光が数波長分だけ伝搬するときの位相遅延に対応する位相遅延が生じる。位相プロファイルに対するこの変動は、スペックルの発現を大幅に低減させる。振動された位相面を空間的に提供する電圧分布を選び出し、かつそれを時間的に変化させることにより、空間的及び時間的の両方の位相変動が光ビームへと導入される。

【0031】電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、その制御可能な空間的に変動するランダムな位相プロファイルがスペックルの低減へと移行 (translate) する方法で、レーザ投影ディスプレイの光学システムに包含される。電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、コヒーレンスの低減を介して、又は光ビームにおける位相の空間的及び／又は時間的なランダム化を介してスペックルを低減させる。電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 を光学システムへ包含すると、光が通って進行する媒体における屈折率のプロファイルを変化させることによって、光ビームの位相プロファイルを効果的にスクランブルさせるようになる。

【0032】図 3 を参照すると、本発明のレーザ投影ディスプレイにおいて使用可能なタイプの電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 の第 1 の実施例が示されている。この電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、アドレス指定が可能な複数の変調器部分の集合物を含むパターン化されたデバイスであり、上記複数の変調器部分は、信号、又は個別の変調器部分に供給されるデータに従って、隣接画素に関して、制御された時間又は位相の遅延を発生する。ラマヌジャン他により 2001 年 8 月 8 日に出願され、ともに譲渡された同時係属中の米国特許出願シリアル番号第 09/924,619 号の明細書は、スペックル除去変調器の設計及び動作についてここに示されたものより詳しく説明している。

【0033】電氣的に制御可能なスペックル除去変調器

160 は、一連の個別の変調器部分 350、355、360 などを有するバルク電気光学基板 370 を備えている。各変調器部分 350 は遅延領域 380 を有し、光のビーム 320 は、上記遅延領域 380 を通って、上部電極 385 と下部電極 400 との間に印加される電界に関連して時間又は位相の遅延に遭遇する。光のビーム 320 は、入力ファセット 340 を介してバルク電気光学基板 370 に入射し、その後は変調器を横断して出力ファセット 345 から出射する。

【0034】電氣的に制御可能なスペックル除去変調器を製造するための電気光学材料の選択肢は数多く存在するが、その中にはニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム及び PLZT が含まれている。簡単化を図るため、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器のためのパラメータに関する以後の議論の中心は、主として 633 nm で照射されるタンタル酸リチウムを使用することにおくが、その幾何学的形状が様々な材料及び照射波長に適用可能であるという点は理解される必要がある。異なる材料が使用される場合は、正しい軸が使用されていることを保証するように配慮しなければならない。例えば、こうしたデバイスの設計に PLZT を使用すると、電気光学係数が大きいために、変調器部分に沿って数桁のオーダーで大きい位相遅延を発生させることが可能である。しかしながら、結晶は、印加される電界が結晶の適正な軸を介して光場 (optical field) と相互作用するように向き付けられる必要がある。

【0035】タンタル酸リチウムの場合、ここに表示されている幾何学的形状は y カットで図示され、これは、光が y 方向に沿って伝搬し、電界が z 方向に沿って印加されることを意味する。最良の結果を得るために、変調器を介して進行する光は x 方向 (横方向) に沿って偏光される。電氣的に制御可能なスペックル除去変調器についての議論のために、結晶軸と伝搬軸とが混同されないように光の伝搬方向を c 軸と呼ぶ。(注意：図 3、図 4 及び図 6 は、電気光学結晶のための標準的な座標系を使用しているのに対して、図 1、図 2、図 8、図 9 及び図 10 は、光が z 軸に沿って伝搬する、典型的な光学の座標系を使用している。) 結晶の他のカット及び幾何学的形状も使用可能であるが、この第 1 の実施例では y カットが最適である。

【0036】図 4 は、光のビーム 320 が変調器の y 軸に沿って伝搬している状態の、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 の断面図を示している。変調器の入力ファセット及び出力ファセットは、反射防止コーティングがされていれば効果的であるといえる。さらに、本デバイスは位相面を効果的に振動するので、変調器への入射光は様々な光源から同時に到来することが可能であるということは認識されている必要がある。電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、いくつかの波長及び角度範囲で同時に動作することができる。



【0037】単一の変調器部分は、上部電極385と下部電極400との間の領域として定義されることが可能である。光線は、図3のx方向に沿って画成されているように、上部電極385と下部電極400との間を結晶に沿って伝搬する。この領域を通過する光は、次式で定義される位相変化 $\Delta\phi$ を取得する。

【0038】

$$\text{【数1】 } \Delta\phi = (\pi/\lambda) n^3 r_{33} l V/d$$

【0039】数1で分かるように、位相変化 $\Delta\phi$ は、印加される電圧Vと、伝搬の長さlと、電極間の距離dと、光の波長 $\lambda$ と、屈折率nと、yカットのタンタル酸リチウムの $r_{33}$ 係数との関数である。5mmから50mmまでの伝搬の長さ $l$ と500 $\mu$ mの厚さと赤のスペクトルにおける照射波長とのような妥当な製造パラメータを所与とすると、0Vと160Vの間の動作電圧に対して、数波長分の位相遅延を発生させることができる。当然のことながら、入力パラメータはすべて、与えられたチャンネル又は変調器部分に沿った多少の遅延を発生するように変更されることが可能である。遅延はすべて、波の距離又は波数によって表されてきた。これは、遅延を、媒体内での光の伝搬速度で除算された遅延距離によって与えられる時間遅延として議論することと等価である。

【0040】再び図3を参照すると、複数の変調器部分350、355、360は、図4の断面図に示されたもののようないくつかの領域によって画成されている。上部電極385及び下部電極400は、各変調器部分を画成している。製造時には、デバイスの上部と下部の両方をパターン化する方法に対して、デバイスの片側に共通のパターン化されていない電極を有することが有益である場合がある。これにより、デバイスの片側の電極に印加される差動電圧を用いた変調が可能となる。本スペックル除去変調器は、本デバイスが一連の変調器部分で構成され、上記変調器部分が、パターン化された電極構造体によってアドレス指定され、かつ予め決められて印加される制御信号に個別に応答するか又はグループで応答することができるという意味において、電気的制御が可能である。各変調器部分は、異なる印加電圧、異なるアドレス時間、又はこれらの組み合わせの手段を用いて独立して動作されることが可能である。電気的に制御可能なスペックル除去変調器160は、アナログ電圧で駆動される変調器、パルス幅変調されるデバイス、又はこれらの組み合わせのいずれかとして使用可能である。スペックル除去変調器に印加される制御信号はまた、スペックルの視認性又はコントラストの低減をモニタするフィードバックループから導出され、次いでスペックルの大きさを維持するか又はさらに低減させるべく信号を駆動するように調整されることが可能である。x方向に沿った任意の与えられた電極の幅は、波長以下の幅から文字通りのミリ単位の幅までのいずれであってもよい。

【0041】上部電極と下部電極の極性の周期的切り替え、又はブランキングパルスの導入が、有用なことがある。こうした2極性の動作は、バルク電気光学基板370における空間電荷の消散を可能にする。さらに、動作電圧は非常に高くなる可能性があり、かつ光場には閉じ込められないことがあるので、電極は、バッファ層405（図4を参照）として作用するような電極の下にSiO<sub>2</sub>のような材料とともにパターン化されることが可能である。また、空気中のアーク放電を防止するために、アクリル樹脂又は他の絶縁材料にてなる保護膜410が形成されていてもよい。

【0042】図3及び図4の電気的に制御可能な電気光学スペックル除去変調器160のために提示されたデバイスの構造は、レーザ投影ディスプレイにおいて使用可能な、このタイプのスペックル除去変調器の一例にすぎない。図6aにはそのような第2の実施例が断面図で示され、ここでは、各変調器部分は結晶のy軸に沿って隔離された一連の電極420乃至435で構成されている。変調器部分は、すべての電極を用いて、又は、電極のうちの部分集合、例えば電極420、425及び430を用いて活性化されることが可能であるので、単一の駆動電圧からでも可変な遅延を提供することができる。

（識別可能な長さを有する）各電極は、印加された電圧が、電極の長さに関連して、波長遅延のうちの異なる既知の小部分を与え得るように駆動されることが可能である。例えば、第1の電極は波長遅延の1/8を発生し、第2の電極は波長遅延の1/16を発生し、第3の電極は波長遅延の1/32を発生する、などが可能である。同じ長さの電極が、異なる波長の光に対する同じ数の波長遅延を発生するように、印加される電圧は調節可能である。それに加えて、電極は各変調器部分内で時間について個別に変調されることが可能であるため、位相はさらにランダム化される。

【0043】図6bには、レーザ投影ディスプレイにおいて有益な電気的に制御可能なスペックル除去変調器のもう1つの実施例が示されている。図6aに示された変調器に比べると、本変調器は複雑さを増しているが、制御は拡張されている。図6bは、隣接する変調器部分間で、異なる局所的な電極の幾何学配置を有している。電極390、392、395を1つの変調器部分（例えば350）内に隔離して配置し、かつ隣接した/近くの変調器部分間で電極390、397、399の位置をずらして配置することにより、変調器は、図5cに示された電気的なクロストークの効果を受けにくくなっている。同様の結果は、隣接する変調器部分350、355、360間と、単一の変調器部分350内との両方で電極間に間隔をもたせることによって達成され得る。一方で、電気的に制御可能なスペックル除去変調器は基本的には位相スクランブラであって、入射光の位相面を局所化された領域でランダムに変化させることが意図されて

いるので、変調器部分間にクロストークを導入することは、さらなる位相の変動を導入することによって、意図された結果を促進することができる。設計者がクロストークの効果を抑制することを希望する場合は、電極間にはクロストークを防止するのに十分な間隔が必要となる。図 3、図 6 a 及び図 6 b に示されたもの以外にも、本発明に従って想到され、かつレーザ投影ディスプレイ 100 内で使用され得る、電氣的に制御可能なスペックル除去空間光変調器に係る他の例示的な構造が存在するということは理解される必要がある。

【0044】スペックルの発現は、横方向の位相プロファイルに対する空間的な変動と、隣接領域間の時間的な変動との両方によって低減されることが可能なので、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器の動作は、これらの両方に適応するように変更されることが可能である。前者の場合は、横方向の電界の分布が電極に対するアドレスの関数として確立される。この分布は、次に、横方向の位相の摂動を画成する。時間的な変動の場合には、異なる変調器部分で同じ電界のプロファイルを使用することができる。しかしながら、時間において、相対的な電界は、隣接する領域が互いに同位相とならないように変化させられる。理想的には、図 5 d に示されたように、両方の動作方法の組み合わせが最良の結果をもたらす。

【0045】電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、入射光の位相面を歪曲する、又はスクランブルするように機能することができる。概念的には、図 7 a 及び図 7 b において、平行化された光線の場合についてこの効果が示され、平面上の平行な波面 325 が変調器 160 上へ垂直に入射するように向き付けられている。図 7 a に示されたときには、変調器 160 にはゼロの駆動電圧が印加され、波面 325 は変化せずに通りぬけている。図 7 b に示されたときには、変調器部分 350 に電圧が印加され、歪曲した波面 330 がデバイスから現われている。図 7 c 及び 7 d は、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 が光学システム内の集束する空間に配置された、同等の場合を示している。これらの波面の歪みの程度は誇張されたものであって、単に一般的な概念を表すためのものであるということは理解される必要がある。これらは必ずしも、1λ だけ離れて配置された波面を示したものではない。

【0046】電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、空間的及び時間的な位相の摂動を提供することによって波面を歪曲することができるが、スペックルの発現に影響する変調器の能力は、それが使用されるシステムの設計にも依存する。本発明は特に、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器が、変調器部分に沿って光源のコヒーレンス長より小さい遅延 ( $\Delta\phi \ll C_L$ ) を提供する場合について考察している。実際、レーザは 1 mm の数分の 1 から数メートルまで (赤/緑/青の光パ

ラメトリック発振器型レーザの場合は 0.1 乃至 5.0 mm) の範囲にわたるコヒーレンス長を有する場合があるが、タンタル酸リチウムに基づいたスペックル除去変調器は数波長分の遅延のみを提供する。従って、前述したように、このデバイスは、時間について変動する波面の歪み又は収差を発生させるために使用可能であるが、空間的又は時間的なコヒーレンスを目に見えるように直接に変更するためには使用可能ではない。幸いにも、時間的及び空間的に変化する位相は投影される画像内のスペックルを変化させる、又は平均化するために使用可能であり、その変化が人の目の応答時間より速ければ、これによりスペックルの知覚可能性が低減される。

【0047】一方で、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器は、提供される位相遅延が光源のコヒーレンス長と同じオーダー ( $\Delta\phi \sim C_L$ ) であるシステムにおいても使用可能である。例えば、アークランプのような典型的な白色光源はわずかに数波長分の程度のコヒーレンス長  $C_L$  と幅の光を放射するが、これは、タンタル酸リチウムに基づいたデバイスによる位相遅延に匹敵するものである。それに代わって、約 1.0 mm の遅延を有する電氣的に制御可能なスペックル除去変調器は、小さいコヒーレンス長のレーザ (OPO 型レーザ等) と組み合わせることで、同じく基本的には遅延とコヒーレンス長とを整合させることができる ( $\Delta\phi \sim C_L$ )。このような場合では、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器は、空間的なコヒーレンスと時間的なコヒーレンスの両方を直接に変更するために、光学システム内で様々な方法で使用可能である。制御可能な位相遅延が光源からの光のコヒーレンス長を大幅に超過していれば ( $\Delta\phi \gg C_L$ )、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 の使用によりさらに大きな劇的效果を実現することができる。

【0048】スペックルの視認性を低減することにおける電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 の効力は、特定のデバイス (図 3、図 6 a 及び図 6 b はこの種の例示的なデバイスを示している) の構造及び性能と、レーザ投影ディスプレイ 100 内でそれが使用される方法との両方に依存している。特に、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、図 1 及び図 2 a に示されたようにフライズ・アイ・インテグレータ 175 の第 1 のレンズレットアレー 178 a に先行して配置される場合があり、図 2 b に示されたようにフライズ・アイ・インテグレータ 175 の内部に配置される場合もあり、もしくは同様にフライズ・アイ・インテグレータ 175 の第 2 のレンズレットアレー 178 b の後に配置される場合もある。1 次元のデバイス (空間光変調器 200) を照射するために使用される典型的なフライズ・アイ・インテグレータに基づいた光学システムでは、各レンズレットアレー (178 a 及び 178 b) におけるレンズレットの個数 (N) は比較的少なく、~6 乃至 20

個のレンズレットで十分な光の均一性を提供している。これに比較すると、典型的な空間光変調器 200 は、比較的多数 (M) の密集した画素を備えているアレーであって、256 個と 4096 個の間の画素数でほとんどのアプリケーションに対応している。図 1 及び図 2 の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 における変調器部分の個数 (P) は、スペックルの視認性を低減させるその効力によって決定され、レンズレットの個数 (N) にも変調器の画素数 (M) にもさほど依存しない。

【0049】電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 が、それによって導入される位相の変化又は遅延はレーザ光ビームのコヒーレンス長に比べて小さい ( $\Delta\phi \ll C_L$ ) という条件下で動作していると仮定すると (数波長に対して数 mm)、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、図 7a 乃至図 7d におけるように光ビームの波面を局所的に変えるように使用可能である。この場合は、1 個のレンズレットに対して多数の変調器部分が存在することになる ( $P \gg N$ )。照射システム内で、画像生成する光のビームの波面を變形する (歪曲する) ために、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、結像される平面 (又はその共役平面のうちの 1 つ) のファーフールド (遠視野) で使用される。従って、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 が第 1 のレンズレットアレー 178a に先行して配置され、かつこのレンズレットアレーが空間光変調器 200 に対して画像共役である図 1 のシステムでは、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、レンズレットアレーから最小限でも焦点深度 (DOF) より大きくオフセットされ、最適な場合としては、この共役平面のファーフールドに存在している (約  $> 10 \times DOF$ )。

【0050】同様に、図 2b に示されたように、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 が第 1 のレンズレットアレー 178a と第 2 のレンズレットアレー 178b との間において第 2 のレンズレットアレー 178b に近接して配置されていれば、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は定義によって第 1 のレンズレットアレーのファーフールドに配置されているので、波面構造の位相を変化させることができる。本光学システムは、光が第 2 のレンズレットアレー 178b のレンズレットをアンダーフィルする (すなわち、光の量が不足する) ように意図的に設計されることが可能なので、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 に必要なフィルファクタは低減されることが可能であり、これにより、変調器部分に対する代替的かつ要件の緩和された電極アドレス指定方式が可能にされ得る。同様に、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、第 2 のレンズレットアレー 178b の後に、かつ最も適当な場合としては第 2 のレンズレットアレー 178

b とコンデンサレンズ 185 との間に配置されることも可能である。これらの様々な場合に対して、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 によって誘発される波面の収差は、大部分、スペックルの生成に寄与する波面の局所的な干渉に影響する。この構成はまた、ビーム整形光学装置によって提供される画像生成の品質にも影響し、これにより、照射される領域のエッジに幾分かの軟調 (softness) を発生させる。

【0051】それに代わって、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 がレーザ光のコヒーレント長に比べて小さい位相の変化又は遅延 ( $\Delta\phi \ll C_L$ ) を提供するこの同じ場合には、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器は、照射システム内の結像する波面を変化させるよりもむしろ、光を散乱させるか又は回折させるディフューザのように機能するように、光学システム内に配置されることが可能である。この場合、変調器部分の個数はレンズレットの個数より多く ( $P \gg N$ )、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、照射システム内の結像する平面のニアフィールド (近視野) に配置される。すなわち、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、公称では、第 1 のレンズレットアレー 178a の直前又は直後に配置され、かつ公称では共役画像平面 (空間光変調器 200 において画像平面に共役である。) のニアフィールド内 ( $< 10 \times DOF$ ) に存在している必要がある。

【0052】これに対して、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 が、それによって導入される位相の変化又は遅延はレーザ光源 110 からの光のコヒーレンス長と同じオーダーである ( $\Delta\phi \sim C_L$ ) という条件下で動作していることが仮定されていれば、本デバイスは、1 つの光ビームに関する光の相対的な時間的コヒーレンスに対して、他のものに関して直接に影響することができる。この場合、変調器部分の個数がレンズレットの個数と同一であり ( $P = N$ )、かつ複数の変調器部分がレンズレットアレー 178a のうちの与えられたレンズレットに対応して整列されていれば、与えられたレンズレット及び変調器部分を通過する光ビームについて、時間的コヒーレンスは他のものに関して変更される。各ビームは、空間光変調器 200 において照射される領域内にその独自のスペックルパターンを生成するが、スペックル全体は、変調器部分のランダムな駆動に伴って時間的に変化する。この場合、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は第 1 のレンズレットアレー 178a に先行して配置されることが可能であるが、ファーフールド又はニアフィールドの位置に関するいかなる厳密な制約も存在しない。同様に、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 は、第 1 のレンズレットアレー 178a と第 2 のレンズレットアレー 178b の間、もしくは第 2 のレンズレットアレー 178b の直後に配置されることが可能である。この構成は、( $\Delta\phi >$

C<sub>L</sub>) 位相の遅延がコヒーレンス長よりかなり大きい場合 (2 倍～3 倍又はこれ以上) に、さらに良好に動作するであろう。

【0053】それに代わって、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器が、通過する光の相対的な時間的コヒーレンスに直接に影響することができるように、それによって導入される位相の変化又は遅延がレーザ光源 110 からの光のコヒーレンス長と同じオーダーである ( $\Delta\phi \sim C_L$ ) という条件下で動作する、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 は、変調器部分の個数

(P) がレンズレットの個数 (N) より多い ( $P > N$ ) 状態でレーザディスプレイ 100 の内部に提供されることが可能である。この場合、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器は、各レンズレットアレーにわたってコヒーレンスを空間的にランダム化し、従って空間光変調器 200 及びスクリーン 215 にわたってコヒーレンスを空間的にランダム化するために使用可能である。この例では、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 は、小さな位相の収差で波面を変化させるために使用されるのではなく、1 つの空間的な領域のコヒーレンスを他のものに関して変化させ、ほぼ非コヒーレントな光源を効果的に合成するために使用される。変調器部分の個数がレンズレットの個数より適度に多ければ (例えば  $P = 8 \times N$ )、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 は第 1 のレンズレットアレー 178 a に先行して配置されることが可能であるが、(変調器部分が可視光を回折、散乱又は散乱させるほど小さくない限り) ファーフィールド又はニアフィールドの位置に関するいかなる厳密な制約も存在しない。この場合は、各レンズレットを通過する光のビームが、比較的大きな複数の隣接した領域へと分割され、時間的コヒーレンスはこれらの領域内で変動する。しかしながら、レンズレットの個数に比較して多数の変調器部分が存在するので ( $P \gg N$ )、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 がむしろディフューザのように機能する場合は、スペckル除去変調器 160 は第 1 のレンズレットアレー 178 a のニアフィールドに配置される必要がある。この場合、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 は、レンズレットアレー 178 a の直前又は直後に配置されることが可能であり、かつ公称では共役画像平面 (空間光変調器 200 において画像平面に共役である。) のニアフィールド内 ( $< 10 \times \text{DOF}$ ) に存在している必要がある。スペckル除去変調器 160 によって提供される位相の遅延がコヒーレンス長より ( $\Delta\phi > C_L$ ) かなり大きい場合は (2 倍～3 倍又はこれ以上)、これらの構成はさらに良好に動作するであろう。

【0054】要約すると、レーザディスプレイシステム 100 は、スペckルの低減/無相関化 (de-correlation) の技術の組み合わせを使用することにより、遠隔のスクリーン 215 上に投影された、知覚可能なスペck

ルを含まない画像を提供するように設計されている。ディフューザ 150 を使用することは、光の有効なラグランジュ又はエタンデュを画成しなおすだけでなく、コヒーレントな入射ビームを、多数の、より小さく、空間的なコヒーレンスの小さい波面に分割する。従って、均一な照射の領域を生成するために、再び結像される複数のビームレットに光を分割する、フライズ・アイ・インテグレート 175 のような光積分システムの使用もまた、ディフューザからの多くの局所的な寄与分をスクリーンにわたって重複することによってさらなるスペckルの低減をもたらす。最後に、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 の使用は、照射光の一部の局所的な位相を照射光の他の部分に関して分裂させる手段を提供し、これにより、局所的な空間的及び/又は時間的なコヒーレンスの関係が変化する。これにより、局所的な波面の位相構造、波面間の時間的なコヒーレンスの関係、又は空間領域にわたる時間的なコヒーレンスのいずれかを変化させることができる。さらに、レーザディスプレイ 100 におけるスペckルを低減するためには、ディフューザ 150 が、散乱させる表面の少なくとも特有の特徴のサイズだけは移動するように、ディフューザ 150 を、ディフューザにリニアの、回転の、又はランダムな運動を伝達する運動機構に装着させることが可能であるということに注意する必要がある。運動の周波数は、フリッカの周波数より大きいものでなければならない ( $> 40 \text{ Hz}$ )。次に、スペckルの視認性は、画像の空間的広がり全体にわたり局所的な領域におけるスペckルの位置及び大きさを時間について平均化することにより、スペckルパターンを無相関化することによってさらに低減される。

【0055】その構成及び動作に依存して、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 は、光源のラグランジュ又はエタンデュを実際に計測可能な程度に増大させるために、光ビームに対して、回折又は散乱のような十分な位相擾動を与えることができる。アレー方向に比較的コヒーレントな照射を必要とするリニア空間光変調器 200 を使用して設計された投影システムの場合、投影システムの画像生成の必要条件を満たすためには、電氣的に制御可能なスペckル除去変調器 160 によって提供される光源のラグランジュにおける小さな変化で十分であるといつてよい。この場合は、レーザディスプレイシステム 100 はディフューザ 150 なしで構成されることが可能である。

【0056】図 1 及び図 2 a の交差アレー光学装置は、ただ 1 つの円柱レンズである交差アレーコンデンサ 195 を備えた、簡単化された光学システムを示しているということもまた理解される必要がある。交差アレーコンデンサ 195 は、交差アレー方向の光ビームを調整し、これをリニア空間光変調器 200 との相互作用のために最適化する。このビーム調整には、複数の円柱レンズ素

子を使用可能であるということは理解される必要がある。レーザ投影システム100内のリニア空間光変調器200に先行するレンズ素子のいくつかは球面レンズであってもよく、かつアレービーム及び交差アレービームの両方を形成することが可能であるという点も理解される必要がある。同様に、投影レンズ205は、スクリーン215におけるアレー方向又は交差アレー方向のいずれかのスポット形成をさらに制御するために、円柱レンズ(図示せず。)を含むことも可能である。同様に、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器を通る光の相互作用を最適化するように光ビームを予め調整するために、交差アレー光学装置(図示せず。)が、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160に先行して設けられてもよいということも理解される必要がある。この場合、交差アレーコンデンサ195又はその等価物は、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160から放出される交差アレー光ビームを、リニア空間光変調器200への入力として最適となるように適合化させる。また、フライズ・アイ・インテグレータに対して代替のビーム均質化光学装置を使用可能であるということも理解される必要がある。特に、(ムーラン(Moulin)の特許)においてさらに記述されている、積分バー/カレイドスコープは、ビーム整形光学装置170のための代替の設計において使用可能であり、均一な照射を提供するとともに、ディフューザ150及び電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160と協働してスペックル低減に対して寄与する効果をもたらす。

【0057】図8に、レーザ投影ディスプレイ100の代替構成が示され、ここでは、ビームスプリッタアレー240を使用して、複合レーザビーム250のコヒーレンスを減少させるように光学距離遅延差を提供している。ビームスプリッタアレー240は、レーザのコヒーレント長のオーダーであるか又はこれより長い、隣接するビームレット245間の光学距離の長さの差( $\Delta d$ )を有する一連のビームレット245を生成する、(R)個の部分反射するミラーより成る装置を備えている。最適には、光学距離の差( $\Delta d$ )は、レーザ110のコヒーレンス長 $C_L$ と同じオーダーのサイズである。ビームスプリッタアレー240の複数のミラーは、最初のミラー(241a)から最後のミラー(241e)へと漸次増加する反射率によって、部分的に透過しかつ部分的に反射している。ビームスプリッタアレー240は、複数のミラーのアレーとして示されているが、プリズムアレー及び他の構造も使用可能である。ビームスプリッタアレー240は、R個のビームレットを使用して複合レーザビーム250を生成する、ビーム拡大器として効果的に動作する。しかしながら、R個のビームレットはコヒーレンス長 $C_L$ に見合う異なる光学距離の長さ( $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3$ , など...)を進行するので、光の時間的なコヒーレンスは、複合レーザビーム250の空

間的な広がりによって変化する。理想的には、R個のビームレット245のそれぞれは、他のものに関して時間的に非干渉性である。しかしながら、複数のビームレット245にてなるグループが互いにコヒーレントとなるように時間的なコヒーレンスの変化がもっと遅い場合であっても、レーザ110のコヒーレント発光の状態が時間的に揺動して、これらのグループ化は時間的にランダムに変化する傾向があるため、この方式は依然として有用である。

【0058】典型的なレーザビーム115は、不均一な光の強度のプロファイルを有するので(ガウスプロファイルが一般的である。)、ビームレット245のそれぞれも不均一となり、同様に、複合レーザビーム250も不均一となる。図1のシステムの場合には、画像生成の必要条件に合わせるように有効な光源のラグランジュ又はエタンデュを変化させるために、ディフューザ150が挿入されている。ディフューザ150はまた、複合レーザビーム250をさらに幾分か均一にしかつコヒーレンスを低減させるように働く。同じく前述のように、空間光変調器200において照射の均一さを改善しかつスペックルの視認性を低下させるために、フライズ・アイ・インテグレータ175が使用される。しかしながら、この場合は、第1のレンズレットアレー178aが各ビームレット245にM個のレンズレットを照射させるように設計されているため、各ビームレット245は光バルブにおいて均一な照射に変換される。従って、各レンズレットアレー178a及び178bには、少なくとも合計 $M \times R$ 個のレンズレットが存在する。スクリーン215における効果は、R個のレーザビームの各々が、ディフューザ、与えられたビームに使用されるM個のフライズ・アイ・レンズレットのベア、及びスクリーンによって決められる、その独自の微細なスペックルパターンを生成することである。 $M \times R$ 個のスペックルパターンは、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160を使用しない場合、又はディフューザ150が動作しない場合でも、非干渉性の状態で加算されて全体の平均化を実現する。いくつかのさほど重大でないアプリケーションではこの程度のスペックルの低減で十分な場合があるが、重大なアプリケーションに関する場合、図8のレーザディスプレイシステム100は電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160を追加してさらに改善される。複合レーザビーム250内の時間的なコヒーレンスは既に重要な変数(significantly variable)であるため、適用される位相の変化がコヒーレンス長より小さい( $\Delta \phi \ll C_L$ )と仮定すれば、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160を使用してビームレット245内の位相の波面を変化させることができる。先の議論の場合のように、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160は、それがビーム整形光学装置170の共役画像平面のファーフールド(焦点深度(DOF))のかな

り外側)に存在するように、レーザディスプレイ100内に第1のレンズレットアレー178aに先行して配置されることが可能である(図8を参照)。同様に前述のように、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160は、共役画像平面のファーフールドの下流側に、第2のレンズレットアレー178bに近接して、図2bのようにその前に配置されるか、又は後に配置されるかのいずれかが可能である。それに代わって、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160がコヒーレンス長に匹敵する位相の変化を提供すれば( $\Delta\phi \sim Cl$ )、本変調器を使用してM個のレンズレットの各々における領域にわたって時間的及び空間的コヒーレンスを変化させることができる。ここで、これらの領域は、光の波長と比較して相対的に大きい(よって散乱も発散もしない)。

【0059】これまでは、画像データを伝達するために、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器及び空間光変調器の両方を利用するレーザディスプレイシステムに係る本発明が、1次元の光変調器を使用することに関連して説明されてきた。電子的投影システムにおいて使用可能な、2次元(領域)の空間光変調器には広範な種類のものが存在するが、特に液晶光パルプ(LCD)及びマイクロメカニカルミラーアレー(テキサス・インスツルメンツからのデジタル・ミラー・デバイスを含む)が卓越している。図1のレーザディスプレイシステムに関して、1次元の空間光変調器から2次元のタイプへ切り換えることによる主たる影響は、照射光学装置と電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160との両方が2次元で動作するように変形される必要があることにある。その場合、フライズ・アイ・インテグレート175は、典型的には、2次元パターンに展開されたフライズ・アイ・レンズレットのアレー178(a, b)を使用し、ここで、上記レンズレットは球面を有している。同様に、ディフューザ150は、図1のリニアシステムでは好適な1次元の散乱ではなく、制御された2次元(又は球面)の散乱を提供する。このようなディフューザは、フィジカル・オブティクス・コーポレーションからホログラフィック・ディフューザとして利用可能であり、又はコーニング・ロチェスター・フォトニクス・コーポレーション(Corning-Rochester Photonics Corp.)からランダム化されたマイクロレンズアレーとして利用可能である。

【0060】図3、図4、図6a及び図6bに詳細に示された空間的な光の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160の様々な実施例は、1次元又はリニアのデバイスである。一連のこれらのデバイスを積み重ねる

(スタックすることにより、もしくは一連のこれらのデバイスを光学システム内のオフセットした位置に配置することにより、2次元の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器を構成することが可能である。また、2次

元構成として使用するにより導電性のある他の電気光学材料を使用し、次いで2次元の画像変調する空間光変調器のアレーを有するレーザディスプレイシステム内に配置されることが可能な、他のタイプの電氣的に制御可能なスペックル除去変調器を設計可能であるということも理解される必要がある。

【0061】例えば図9は、LCDのような領域型の変調器アレーを使用するレーザ投影ディスプレイ100の断面図を示している。前述のように、レーザ110はレーザビーム115を放射し、レーザビーム115は、空間光変調器(液晶ディスプレイ255)を照射するために、ビーム拡大光学装置120とディフューザ150とビーム整形光学装置170とによって予め調整される。次いで、前述のように、ディフューザ150と、フライズ・アイ・インテグレート175と、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160とはすべて、空間光変調器及びスクリーン215における2次元にわたるスペックルの存在を低減するために寄与する。図1のシステムとは異なり、図9のシステムでは、2次元のスクリーン上の画像は走査によって形成されるのではなく、投影レンズ205を使用することによって空間光変調器(液晶ディスプレイ255)をスクリーン215に直接に結像する。照射光は、プレポライザ260及び偏光ビームスプリッタ265を通過する。液晶ディスプレイ255は印加されるコマンド信号に従って、照射光を変調し、この光の偏光状態を画素に基づいて回転させる。投影レンズ205によってスクリーン215へと向けられる、変調された、画像を生成する光ビーム275は、偏光ビームスプリッタ265から反射される、偏光が回転された光によって形成される。公称では、暗状態(dark state)を画成するために偏光アナライザ270が交差された向きで使用される。典型的なレーザ光源は偏光を放射するので、図9のレーザディスプレイ100ではプレポライザ260を使用する必要のない場合がある。その場合は、レーザビーム115は、レーザ110によって放射されるときに十分に偏光されていて(例えば100:1)、ディフューザ150も電氣的に制御可能なスペックル除去変調器160も、本来のこの偏光コントラストの程度を有意に低下させないということが必要である。

【0062】同様に、図10は、テキサス・インスツルメンツから利用可能なDLPチップのようなマイクロメカニカルミラーアレー280を使用するレーザ投影ディスプレイの断面図を示している。光を変調するために、制御された偏光の効果に依存する、液晶空間光変調器を用いたシステムとは異なり、マイクロメカニカルミラーアレー280は光のビームレットの角度の制御を画素毎の基準で利用する。本システムは図1に示されたシステムと実質的に同じであるが、照射が、マイクロメカニカルミラー光アレー280を超えて開口部290へと集束



する点が異なる。個別の画素は複数のマイクロミラーによって形成され、上記マイクロミラーは、光を、投影レンズ 205 の開口部 290 を通過させるように向けるか、又は停止部 285 (すなわちシュリーレン型光学システム) に向けるかのいずれかを行う。画素の明るさは、レンズの開口部 290 を介して光が向けられるフレーム内における時間の比率を選択することによって制御される。このタイプのシステムは、図 10 の場合のように、2 次元の空間光変調器アレー、2 D のフライズ・アイ・システム、及び 2 D の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160 を含むか、それに代わって 1 D の空間光変調器アレー、1 D のフライズ・アイ・システム、1 D の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器 160、及び図 1 で使用されているガルバノメータのようなスキャナを含むかのいずれかで構成されることが可能である。

【0063】 簡単化のために、本発明は、単一のレーザと単一の空間光変調器とを使用して実地説明されているが、より一般的な議論がフルカラーの RGB 投影ディスプレイに対して向けられる。システムは、別個の光学距離をたどって個々の赤と緑と青の空間光変調器を照射する、別個の赤と緑と青の光ビームによって構成され得ることは理解される必要がある。変調された光ビームは、典型的には投影レンズの前に配置された x プリズムによって結合された色となり、結果的に生じる光ビームがスクリーンに結像されて多色 (polychromatic) 画像を提供する。別個の赤と緑と青のビームは、3 つの別々のレーザから、非線形光学装置の組み合わせを使用して 3 つのビームを出力する 1 つの OPO 型レーザパッケージから、もしくは、後で色を分割される単一の白色光レーザビーム出力を供給するように統合化された OPO 型レーザパッケージから発生されることが可能である。

#### 【0064】

【発明の効果】 本発明は、光学システムの照射部分内に配置された電氣的に制御可能なスペックル除去変調器により、投影される画像においてスペックルが低減されるレーザディスプレイシステムを提供する。プロジェクト内に統合化された設計を使用してスペックルを除去する方法は、システムの動作性能が、劇場毎にアプリケーション及び設計が変わる可能性のある、振動するスクリーンのような外部手段に依存しないということを意味する。それに加えて、このスペックル除去手段は、従来にはより多く行われているように画像生成光学装置内においてではなく照射システム内で機能するので、スペックルは、スクリーン上の画像品質に影響を与えることなく知覚可能な限界よりも低下させることができる。さらに、照射システム内のスペックル除去変調器の設計及び動作を調整することにより、このシステムは、フィードバックシステムを用いてオンザフライで最適化されるか、又はレーザ光源及び空間光変調器の技術が経時的に

進化するのに伴って段階的に最適化されるかのいずれかが可能である。最後に、このシステムは当然ながら、機械的かつ電氣的に頑健であり、光効率が良く、アライメント不良に対して敏感ではない。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明に係る、電氣的に制御可能な電気光学スペックル除去変調器とリニア空間光変調器とを有するレーザディスプレイシステムの斜視図である。

【図 2 a】 本発明に係る、電氣的に制御可能な電気光学スペックル除去変調器とリニア空間光変調器とを有するレーザディスプレイの断面図である。

【図 2 b】 図 2 a に示されたレーザディスプレイ光学システムの一部に対する代替構成の断面図である。

【図 3】 本発明に使用される、電氣的に制御可能な電気光学スペックル除去を実行する時間/位相遅延変調器の第 1 のバージョンの斜視図である。

【図 4】 本発明に使用される時間/位相遅延変調器の第 1 のバージョンの断面図である。

【図 5 a】 視認性スペックルを呈示する光学システムの出力の位相プロファイルを表す図である。

【図 5 b】 低減された視認性スペックルを有する光学システムの出力の位相プロファイルを表す図である。

【図 5 c】 クロストークを呈示する、電氣的に制御可能なスペックル除去変調器の出力の位相プロファイルを表す図である。

【図 5 d】 横方向及び時間について変化する位相擾動の両方を有する電氣的に制御可能なスペックル除去変調器の隣接する変調器部分間の相対的な位相遅延を示すチャートである。

【図 6 a】 本発明のレーザ投影ディスプレイにおいて使用可能な、代替の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器の斜視図である。

【図 6 b】 本発明のレーザ投影ディスプレイにおいて使用可能な、代替の電氣的に制御可能なスペックル除去変調器の斜視図である。

【図 7 a】 本発明に係る変調器の効果を、入射する平行化された光線の場合に、影響を受けない波面に関して示す図である。

【図 7 b】 本発明に係る変調器の効果を、入射する平行化された光線の場合に、歪曲された波面に関して示す図である。

【図 7 c】 本発明に係る変調器の効果を、入射する集束する光線の場合に、影響を受けない波面に関して示す図である。

【図 7 d】 本発明に係る変調器の効果を、入射する集束する光線の場合に、アボートされた波面に関して示す図である。

【図 8】 コヒーレンス長のオーダーの複数の遅延を組み込んだ、本発明に係るレーザディスプレイシステムの代替の実施形態の断面図である。

【図 9】 液晶ディスプレイ光バルブを使用する、本発明に係るレーザディスプレイシステムの断面図である。

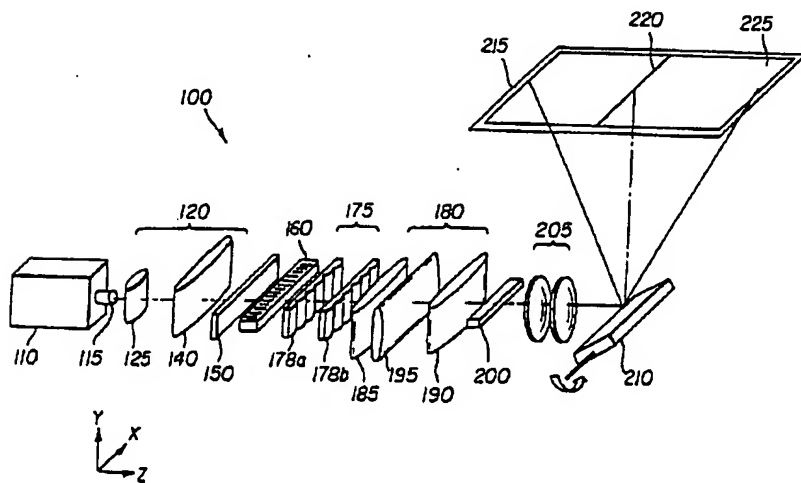
【図 10】 マイクロアレー光バルブを使用する、本発明に係るレーザディスプレイシステムの代替の実施形態の断面図である。

【符号の説明】

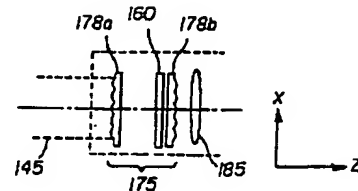
100…レーザディスプレイシステム、  
110…レーザ、  
115…レーザビーム、  
120…ビーム拡大光学装置、  
125…発散レンズ、  
130…発散ビーム、  
140…コリメートレンズ、  
145…平行化されたビーム、  
150…ディフューザ、  
160…電氣的に制御可能なスペクル除去変調器、  
175…フライズ・アイ・インテグレータ、  
178a…第 1 のレンズレットアレー、  
178b…第 2 のレンズレットアレー、  
180…ビーム整形光学装置、  
185…コンデンサレンズ、  
190…視野レンズ、  
195…交差アレーコンデンサ、  
200…リニア空間光変調器、  
205…投影レンズ、  
210…ガルバノメータミラー、  
215…スクリーン、  
220…線状画像、

225…領域画像、  
240…ビームスプリッタアレー、  
241a乃至241e…ミラー、  
245…ビームレット、  
250…複合レーザビーム、  
255…液晶ディスプレイ、  
260…プレポラライザ、  
265…偏光ビームスプリッタ、  
270…偏光アナライザ、  
275…変調された画像を生成する光ビーム、  
280…マイクロメカニカルミラーアレー、  
285…停止部、  
290…開口部、  
320…光、  
325…波面、  
330…歪曲された波面、  
340…入力ファセット、  
345…出力ファセット、  
350, 355, 360…変調器部分、  
370…バルク材料又は基板、  
380…遅延領域、  
385…上部電極、  
390, 392, 395, 397, 399, 420, 425, 430, 435…電極、  
400…下部電極、  
405…バッファ層、  
410…保護膜。

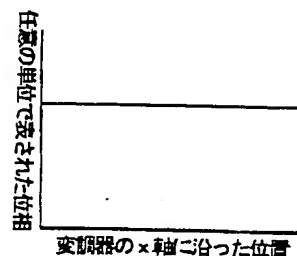
【図 1】



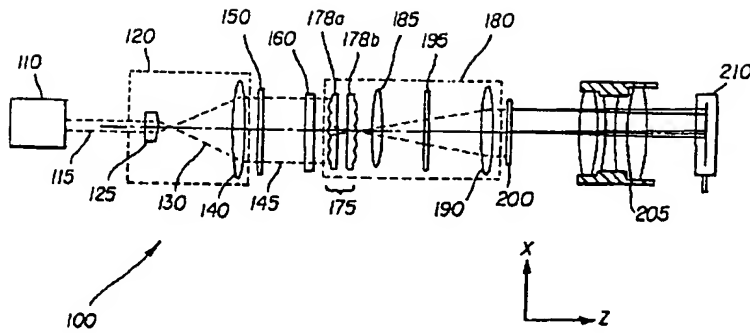
【図 2 b】



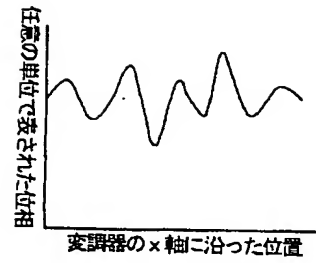
【図 5 a】



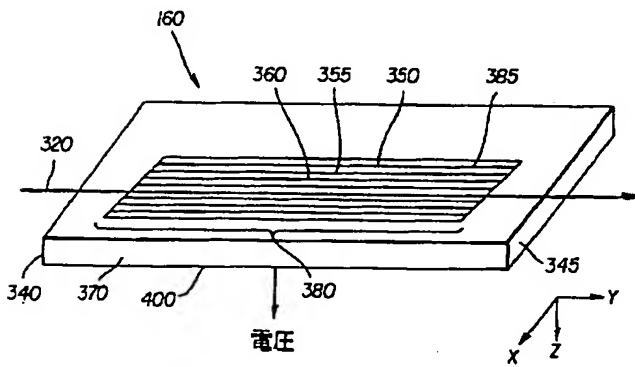
【図 2 a】



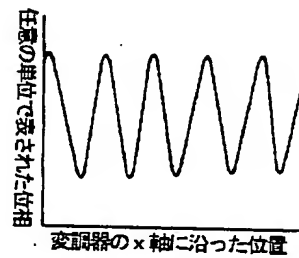
【図 5 b】



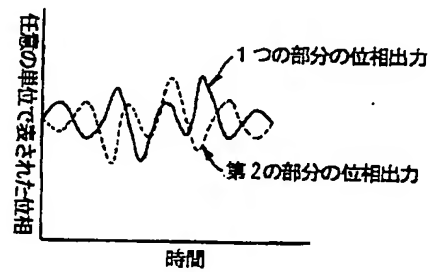
【図 3】



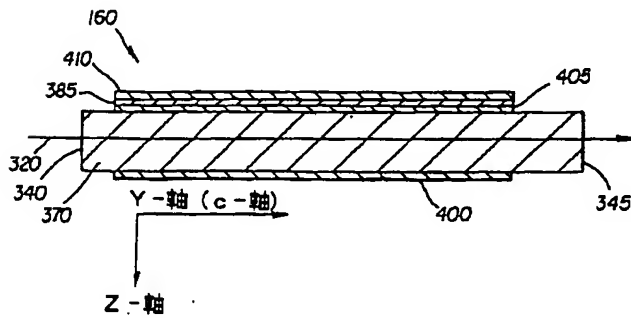
【図 5 c】



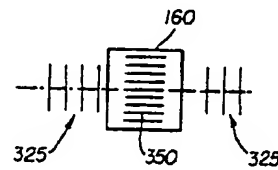
【図 5 d】



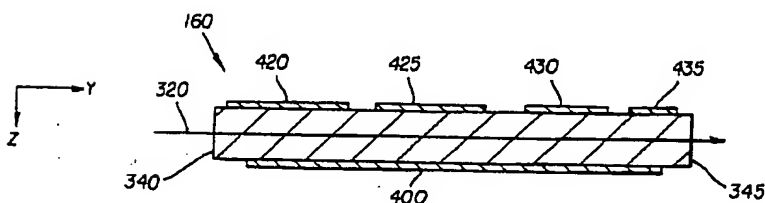
【図 4】



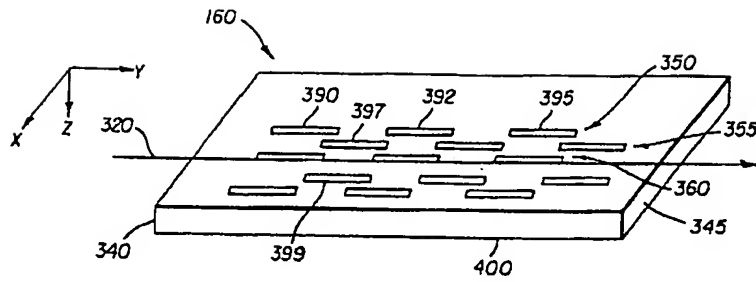
【図 7 a】



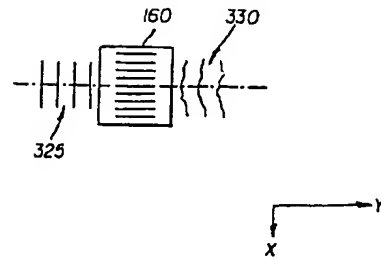
【図 6 a】



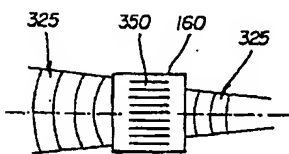
【図 6 b】



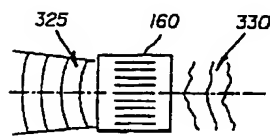
【図 7 b】



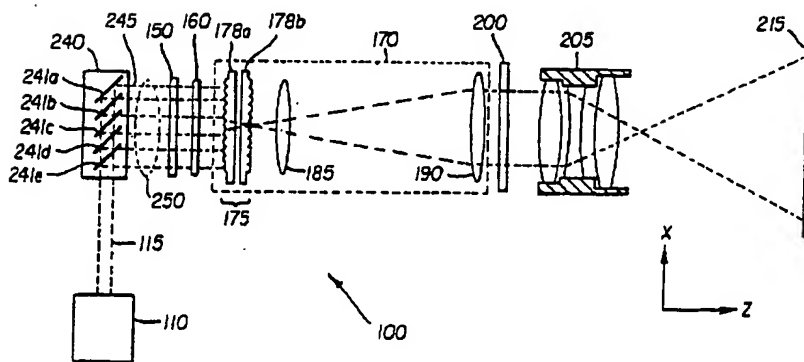
【図 7 c】



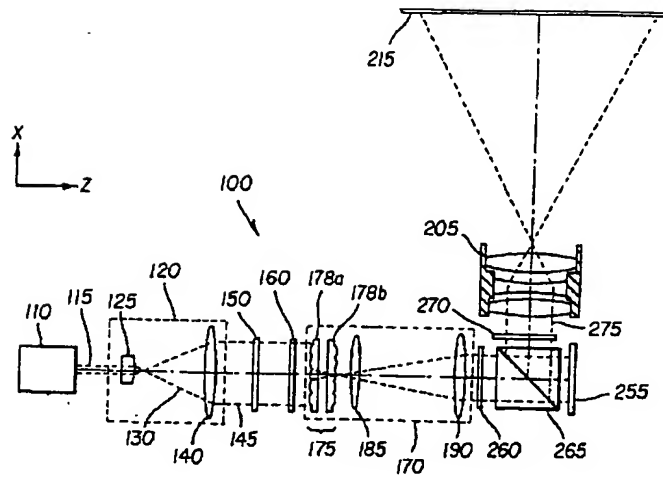
【図 7 d】



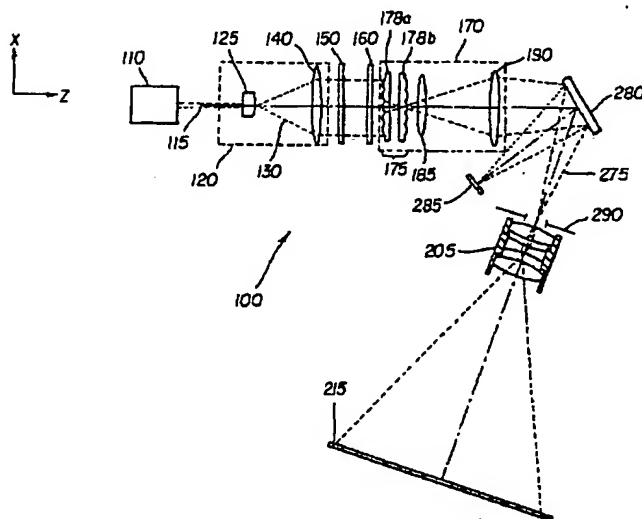
【図 8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 スジャータ・ラマヌジャン  
アメリカ合衆国14534ニューヨーク州ピッ  
ツフォード、シーダーウッド・サークル18  
番

Fターム(参考) 2K103 AA01 AB04 AB10 BA01 BC23  
BC26 BC51

【外国語明細書】

- 1 -

## LASER PROJECTION DISPLAY SYSTEM

### FIELD OF THE INVENTION

The invention relates to projection display apparatus employing a  
5 laser as a light source. More particularly, the invention relates to laser projection  
display apparatus having means for reducing the appearance of coherence-induced  
artifacts and speckle in the display.

### BACKGROUND OF THE INVENTION

Projection display systems for the display of video images are well-  
10 known in the prior art. These systems can take the form of a white light source,  
most notably a xenon arc lamp, illuminating one or more light valves or spatial  
light modulators with appropriate color filtering to form the desired image, the  
image being projected onto a viewing screen.

Lasers have been known to be attractive alternative light sources to  
15 arc lamps for projection displays. One potential advantage is a wider color gamut  
featuring very saturated colors. Laser illumination offers the potential for simple,  
low-cost efficient optical systems, providing improved efficiency and higher  
contrast when paired with some spatial light modulators. One disadvantage of  
lasers for projection display has been the historical lack of a cost-effective laser  
20 source with sufficient power at visible wavelengths. However, such lasers (albeit,  
still high cost) are now produced by JenOptik and Lumera Laser, GmbH, and are  
mode-locked, diode-pumped, solid-state lasers, each with a nonlinear-optical  
system featuring an optical parametric oscillator (OPO) to simultaneously  
generate red, green, and blue light. This system has been disclosed by  
25 Wallenstein in US Patents 5,828,424, issued October 27, 1998, and 6,233,025  
issued May 15, 2001; and by Nebel in US Patent 6,233,089, issued May 15, 2001.  
Another example disclosed by Moulton in US Patent 5,740,190, issued April 14,  
1998 is developed by Q-Peak and is a Q-switched DPSS laser with an OPO  
system to simultaneously generate red, green, and blue light.

30 Spatial light modulators provide another component that enables  
laser display systems. Examples of two-dimensional spatial light modulators are



reflective liquid crystal modulators such as the liquid-crystal-on-silicon (LCOS) modulators available from JVC, Three-Five, Aurora, and Philips, and micromirror arrays such as the Digital Light Processing (DLP) chips available from Texas Instruments. Advantages of two-dimensional modulators over one-dimensional  
5 array modulators and raster-scanned systems are the absence of scanning required, absence of streak artifacts due to non-uniformities in the modulator array, and immunity to laser noise at frequencies much greater than the frame refresh rate ( $> 120$  Hz). A further advantage of two-dimensional spatial light modulators is the wide tolerance for reduction of the spatial coherence of the illuminating beam. On  
10 the other hand, some valuable modulator technologies can be readily fabricated as high fill factor one dimensional devices, although the two dimensional constructions are more limited. Examples of one-dimensional or linear spatial light modulators include the Grating Light Valve (GLV) produced by Silicon Light Machines and described in US Patent 5,311,360 issued May 10, 1994 to  
15 Bloom et al.; the conformal grating modulator, described in US Patent 6,307,663 issued October 23, 2001 to Kowarz, and the electro-optic reflective grating modulator described in US Patent 6,084,626 issued July 4, 2000 to Ramanujan et al.

Although high power visible lasers offer new opportunities for the  
20 design of projection systems, including the possibilities of expanded color gamut and simplified optical designs, laser light is in other ways not optimum for use in image projection systems with spatial light modulators. In particular, lasers are very bright sources, which emit generally coherent light within a very small optical volume (etendue or lagrange). Etendue is the product of the focal spot  
25 area and the solid angle of the beam at the focus. Lagrange is the product of the focal spot radius and the numerical aperture. For example, a single mode green wavelength laser with a diffraction-limited beam has a lagrange of about  $0.3 \mu\text{m}$ , which is about 15,000 times smaller than the lagrange for a conventional white light lamp source, such as an arc lamp. With such a small lagrange, lasers can be  
30 used very effectively in raster scanning systems, including those for flying spot printers and laser light shows, where a tightly controlled beam is desirable.

On the other hand, in an image projection system, in which an image-bearing medium such as a film or a spatial light modulator is imaged to a screen or a target plane, the high coherence and small lagrange of the laser is ultimately undesirable. In such an imaging system, the lagrange is determined by the linear size of the projected area (size of the spatial light modulator) multiplied by the numerical aperture of the collection lens. The related quantity, etendue, is calculated similarly. In many white light projection systems, the projection lens is quite fast ( $f/3$  for example) to collect as much light as possible. Even so, the typical white light lamp source overfills both the light valve and the projection lens, and significant light is lost. For example, in a representative system using a common 0.9" diagonal light valve and an  $f/3$  projection lens, the optimum light source would have approximately a 2.0-mm lagrange to provide proper filling without overfill. However, a standard white light lamp, with a typical lagrange of 2-10 mm, is not sufficiently bright and will generally overfill this representative system.

In the case of a laser display system using image area projection (as opposed to raster scanning), the opposite problem arises, the lasers being too bright. Furthermore, it is not desirable to illuminate the spatial light modulator with a coherent source, because of the potential for interference effects, such as fringes, which may overlay the displayed image. Diffraction artifacts can arise from illuminating the grid electrode pattern of a liquid crystal panel, an X-cube with a center discontinuity, or any dust or imperfections on the optical elements with a highly coherent beam of light. Therefore, a reduction of the source brightness (or an increase in the source lagrange) is a necessity for such laser projection systems.

A defined reduction of the source brightness can also provide an important opportunity. The projection display optical system can be designed to optimize and balance the system requirements for resolution, system light efficiency, and system simplicity. By defining the system f-number on the basis of a criterion other than system light efficiency, the specifications on other system components such as the projection lens, color filters, and polarization optics can

be eased, dramatically reducing system costs compared to some lamp-based projection systems.

While laser sources can be optimized for use in projection display illumination and imaging systems, there is the consequent major disadvantage of speckle to be dealt with. Speckle arises due to the high degree of coherence (both  
5 spatial and temporal) inherent in most laser sources. Speckle produces a noise component in the image that appears as a granular structure, which both degrades the actual sharpness of the image and annoys the viewer. As such, the speckle problem, as well as the historical lack of appropriate laser sources, has inhibited  
10 the development of marketable laser-based display systems.

The prior art is rich in ways of attempting to reduce speckle. One common approach is to reduce the temporal coherence by broadening the linewidth of the laser light. Other approaches to reducing the temporal coherence are to split the illuminating wavefront into beamlets and delay them relative to  
15 each other by longer than the coherence time of the laser, see for example US Patent 5,224,200, issued June 29, 1993 to Rasmussen et al. Dynamically varying the speckle pattern by vibrating or dynamically altering the screen is another way of reducing the visibility of the speckle pattern; see, for example, US Patent 5,272,473 issued December 21, 1993 to Thompson et al. Another speckle  
20 reduction approach involves coupling the laser light into a multimode optical fiber and vibrating the fiber to cause mode-scrambling as described in US Patent 3,588,217, issued June 28, 1971 to Mathisen.

Another family of de-speckling solutions uses a diffusing element that is moved or vibrated within the projector system. Typically, this is done at an  
25 intermediate image plane, as disclosed in US Patent 4,035,068, issued July 12, 1977 to Rawson. One disadvantage of this approach is that the diffusion must occur precisely at the image plane or a softening of the image will occur. Also, the projection lens is complicated by the requirement to provide an intermediate image plane. A means of dynamically varying the speckle pattern by dynamically  
30 diffusing the laser beam in the illumination path of the device would be preferable. A hologram illumination system utilizing this approach has been

disclosed by vanLigten in US Patent 3,490,827, issued January 20, 1970, in which a diffuser is rotated in the focus of a beam expander. Florence discloses in US Patent 5,313,479, issued May 17, 1994, illuminating a light valve through a rotating diffuser. These approaches have the disadvantage of not being adaptable to uniform efficient illumination of a rectangular spatial light modulator.

5  
Butterworth et al. in US Patent 6,005,722, issued December 21, 1999, disclose a system in which a variable-thickness plate is rotated in the illumination of a light-pipe homogenizer. When used with lasers, though, light pipe homogenizers require either a large numerical aperture or a substantial length to achieve

10  
sufficient uniformity, and offer less control with fewer degrees of design freedom than systems designed with fly's eye optics. Therefore, it is harder to control the illumination brightness while producing a uniform illumination in a compact system.

Finally, the laser projection system disclosed by Trisnadi in US

15  
Patent 6,323,984, issued November 27, 2001, describes a design in which a wavefront phase modulator is used to impart a structured phase profile across the imaging beam. Image data is imparted to the beam by means of a linear GLV type spatial light modulator. This modulator is imaged to an intermediate plane where the wavefront modulator resides, and the intermediate image is

20  
subsequently re-imaged to a screen, with the image scanned out through the motion of a galvanometer. This system relies on the fact that a static phase profile, which is provided by the wavefront modulator, is imparted to the line image in the narrow (in-scan) direction. At any instant of time, a single point on the screen will be illuminated by one point on the phase profile. The total

25  
intensity at a single point on the screen is the "incoherent" addition of all the phases. Further the phase profile of the wavefront modulator must be such that the interference effects from the high and low phase steps generally cancel each other out. While the system of the '984 patent does provide some speckle reduction, the fact that wavefront modulator is located at an intermediate image

30  
plane within the imaging system, rather than within the illumination system, compromises the system performance, as the phase changes are limited by the

constraint of not significantly effecting image quality. Also, as the  
aforementioned wavefront modulator is a static device, which is constructed as a  
passive spatially variant phase grating, it provides less control and variation of  
phase than an active device, and therefore potentially less speckle reduction.

5 Another disadvantage of using a laser as a light source in an image  
projector is the susceptibility of interference or the occurrence of diffraction  
artifacts in the light valve. This is especially true of liquid crystal modulators,  
wherein the thin-film structure can result in fringes in the image due to non-  
uniformities in the film layers. Diffraction artifacts arise from illuminating a grid  
10 electrode pattern in the light modulator with a highly coherent beam of light.

There is a need therefore for a laser-based display system that uses  
a spatial light modulator, allows control of the illumination brightness to optimize  
system design, and exhibits reduced speckle and eliminates coherence artifacts at  
the spatial light modulator while exhibiting high throughput efficiency.

#### 15 SUMMARY OF THE INVENTION

The need is met according to the present invention by providing a  
display apparatus that includes a laser light source for emitting a light beam  
having a coherence length; a beam expander for expanding the light beam; a  
spatial light modulator; beam shaping optics for shaping the expanded laser beam  
20 to provide uniform illumination of the spatial light modulator, the beam shaping  
optics including a fly's eye integrator having an array of lenslets; a diffuser  
located in the light beam between the laser light source and the beam shaping  
optics; an electrically controllable de-speckling modulator for modifying the  
temporal and spatial phase of the light beam; and a projection lens for producing  
25 an image of the spatial light modulator on a distant screen.

#### ADVANTAGES

The present invention provides for a laser display system in which  
speckle is reduced in the projected image by means of an electrically controllable  
de-speckle modulator positioned within the illumination portion of the optical  
30 system. This method of de-speckling, using an integrated design within the  
projector, means that the operational performance of the system does not depend

on external means, such as the vibrating screens, which may vary in application and design from one theatre to another. Additionally, as this de-speckling means functions within the illumination system, rather than within the imaging optics, as is more conventionally done, speckle can be reduced to below perceptible limits without impacting the on screen image quality. Furthermore, by tuning the design and operation of the de-speckle modulator within the illumination system, this system could be optimized either on-the-fly with a feedback system, or progressively, as the laser source and spatial light modulator technologies evolve over time. Finally, this system should be mechanically and electrically robust, light efficient, and insensitive to mis-alignment.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Fig. 1 is a perspective view of the laser display system with an electrically controllable electro-optic de-speckling modulator and a linear spatial light modulator according to the present invention;

Fig. 2a is a cross-sectional view of the laser display with an electrically controlled electro-optic de-speckling modulator and a linear spatial light modulator according to the present invention;

Fig. 2b is a cross-sectional view of an alternate configuration for a portion of the laser display optical system depicted in Fig. 2a;

Fig. 3 is a perspective view of a first version of the electrically controllable electro-optic de-speckling time/phase delay modulator used in the present invention;

Fig. 4 is a cross-sectional view of the first version of the time/phase delay modulator used in the present invention;

Fig. 5a is a representation of the phase profile of the output of an optical system exhibiting visibility speckle;

Fig. 5b is a representation of the phase profile of the output of an optical system that has reduced visibility speckle;

Fig. 5c is a representation of the phase profile of the output of an electrically controllable de-speckling modulator exhibiting cross talk;



Fig. 5d is a chart of the relative phase delay between adjacent modulator sites for an electrically controllable de-speckling modulator with both lateral and time varying phase perturbations;

5 Figs. 6a and 6b are perspective views of alternate electrically controllable de-speckling modulators that can be used in the laser projection display of the present invention;

Figs. 7a and 7b illustrate the effect of a modulator of the present invention in terms of an unaffected wavefront and an distorted wavefront respectively, in the case of incident collimated light;

10 Figs. 7c and 7d illustrate the effect of a modulator of the present invention in terms of an unaffected wavefront and an aborted wavefront respectively, in the case of incident convergent light;

Fig. 8 is a cross-sectional view of an alternative embodiment of the laser display system according to the present invention, incorporating multiple delays on the order of the coherence length;

Fig. 9 is a cross-sectional view of the laser display system according to the present invention using a liquid crystal display light valve; and

Fig. 10 is a cross-sectional view of an alternative embodiment of the laser display system according to the present invention using a micromirror-array light valve.

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

Laser display system 100 according to one embodiment of the present invention, is shown in perspective view in Fig. 1, and includes a laser 110 that emits a laser beam 115 of a desired wavelength in either a continuous or pulsed fashion. The laser 110 can be, for example, a solid state laser, a fiber laser, a gas laser, or a semiconductor laser. Laser 110 is preferably a diode-laser-pumped solid state laser including a laser crystal (e.g. Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YVO<sub>4</sub>, or Yb:YAG) that emits infrared pulses of light and includes nonlinear optics (typically optical parametric oscillators (OPOs)) that convert the infrared pulses of light from the laser crystal into red, green, and blue pulses of light. Mode-locked RGB lasers suitable for laser 110 are manufactured by Lumera

Laser GmbH and JenOptik. Another suitable laser is the Q-switched RGB laser developed by Q-Peak. For simplicity, the laser display system 100 is depicted for one wavelength only. These lasers generally produce high quality single mode beams, which have moderate laser line widths ( $<1.5$  nm), small source lagrange values ( $<0.5$   $\mu$ m), and moderately long coherence lengths  $C_L$  (0.1-10.0 mm).

Laser display system 100 is shown in cross-sectional view in Fig. 2a, to clarify some aspects of the design not readily shown in the perspective view of Fig. 1.

Beam expansion optics 120 expand the laser beam to produce a collimated beam 145 with the necessary diameter to nominally fill the aperture of beam-shaping optics 170. The beam expansion optics 120 can be, for example, an afocal pair of lenses, as is well-known to one skilled in the art of optics. Alternately, for example, a three element zooming Galilean or Keplerian beam expander could be used. The afocal pair beam expansion optics 120 comprises a diverging lens 125 and a collimating lens 140. The diverging lens 125 can be a single lens or a compound lens such as a microscope objective, and transforms the light beam 115 into a diverging beam 130. The collimating lens 140 can be a single or a compound lens, and transforms the diverging beam 130 into a collimated beam 145. This collimated beam 145 interacts with diffuser 150 and an electrically controllable de-speckling modulator 160, and then is further altered by beam shaping optics 170.

As the laser display system of Figs. 1 and 2a uses a linear spatial light modulator 200, which is long in the x direction, and narrow in the y-direction, the beam expansion optics 120 and beam shaping optics 170 are constructed anamorphically, and generally use an appropriate arrangement of cylindrical lenses. In particular, it is typically desirable to flood illuminate linear spatial light modulator 200 with a long narrow line of uniform telecentrically incident light. For example, the illuminating light beam may have a uniform light profile extending 25-75 mm in the array (x) direction), whereas, the narrow cross array direction light only illuminates a 20-100  $\mu$ m width, typically with either a uniform or Gaussian beam profile. In the simplified case of the laser display system of Fig. 1, the cross array optics, which condense or focus the beam of light

onto linear spatial light modulator 200 are shown for simplicity as a single lens, cross array condenser 195.

Thus, in the case of the Fig. 1 system, for a laser projection display using a linear spatial light modulator 200, the beam expansion optics 120 work in the array direction only, and are thus anamorphic, providing beam expansion in the direction of the linear light valve (x-direction). In this case the beam-shaping optics 180 are also anamorphic (cylindrical cross-sections), with optical power in the x-direction, and flat surfaces in the y-direction (except for cross array condenser 195). Beam shaping optics 180 includes a fly's eye integrator 175. The fly's eye integrator 175 provides efficient, uniform illumination over the area of a linear spatial light modulator 200. The fly's eye integrator 175 includes a first lenslet array 178a and a second lenslet array 178b, which are typically identical. The first and second lenslet arrays 178a and 178b include a plurality of lenslets with cylindrical surfaces, arrayed in a one-dimensional pattern. The second lenslet array 178b is separated from the first lenslet array 178a by approximately the focal length of the lenslets on the first lenslet array 178a, such that each lenslet in the first lenslet array 178a focuses light into the corresponding lenslet in the second lenslet array 178b. Other designs are possible in which the first and second lenslet arrays 178a and 178b are different, but are matched to provide the desired illumination.

Alternately, the first and second lenslet arrays 178a and 178b can be integrated in a single block of glass or plastic. Also, the invention can be accomplished without the use of the second lenslet array 178b, especially if a small diffusion angle is used.

The beam-shaping optics 180 also includes a condenser lens 185 and a field lens 190 located behind the fly's eye integrator 175. The second lenslet array 178b, works in combination with the condenser lens 185, to image the lenslets of first lenslet array 178a in overlapping fashion to provide an area of uniform illumination at the linear spatial light modulator 200. Field lens 190 provides telecentric illumination of the linear spatial light modulator 200 in order to desensitize the system to defocus errors and to minimize the total numerical

aperture of the illumination. Field lens 190 nominally has a focal length equal to the lenslet focal length multiplied by the magnification of the illumination image. The spacing between the field lens 190 and the condenser lens 185 should likewise be generally equal to the focal length of the condenser lens 185 in order to make the illumination telecentric. The focal lengths of the lenslet arrays and condenser lens 185 are typically chosen to provide sufficient working distance near the linear spatial light modulator 200 that the opto-mechanics can be designed with relative ease. While individual lenslets may be as small as 100  $\mu\text{m}$  in width, or as large as  $\sim 8$  mm in width, the individual lenslets are typically 1-5 mm wide. The range of available lenslet sizes does depend on the manufacturing technologies used.

The linear spatial light modulator 200 generates a single line 220 of the image at any moment in time. A scanner such as a galvanometer mirror 210, a spinning polygon, or a rotating prism sweeps the image lines across the screen to form a two-dimensional area image 225 on the screen 215. In the case of the laser display system 100 depicted in Figs. 1 and 2a, the system is configured as a post-objective scanner, with projection lens 205 located prior to galvanometer mirror 210. As an example, if linear spatial light modulator 200 has an active area 40 mm long, and the desired image size on screen 215 is 30 ft. wide, then projection lens 205 would operate with a magnification of  $\sim 230\times$ .

A variety of different technologies can be used for linear spatial light modulator 200. As simplistically depicted in Figs. 1 and 2a, this device is a transmissive modulator, which encodes the image data in the light beam by modulating the light in some way. This device, for example, could be an electro-optic modulator array made from PLZT which rotates the polarization of the incident light on a per pixel basis. In that case, a polarization beam splitting prism (not shown) would be located somewhere between linear spatial light modulator 200 and galvanometer mirror 210, so as to separate the modulated and unmodulated portions of the light beam. Alternately, the linear spatial light modulator 200 could be a transmissive acousto-optical array device, much like the device in discussed in US Patent 5,309,178, issued May 3, 1994 to Gross which

imparts a phase profile to the incident beam on a per pixel basis. In that case, a Schlieren type optical system can be constructed by placing a spatial filter (not shown) at Fourier plane internal to projection lens 205. Reflective grating modulator arrays can also be used, such as grating light valve (GLV) described in  
5 US Patent 5,311,360, issued May 10, 1994 to Bloom et al.; a conformal grating device as described in US Patent 6,307,663, issued October 23, 2001 to Kowarz; or an electro-optic grating as described in US 6,084,626, issued July 4, 2000 to Ramanujan et al. In these cases, the laser projection display 100 must also be modified to deflect the light beam down onto the modulator and return the  
10 reflected beam into the system (such modifications are not shown in Figs. 1 & 2a but are within the ordinary skill in the art of optical systems design).

A diffuser 150, is disposed between the laser 110 and the beam-shaping optics 180, to modify the brightness or etendue of the laser light to match the imaging requirements of the projection system. In the case of the laser display  
15 system 100 of Figs. 1 and 2a, which has a linear spatial light modulator 200, diffuser 150 nominally is also one-dimensional. That is, diffuser 150 only diffuses light along the length of the light valve array (x direction in the figure), while leaving the beam nominally unaltered in the y-direction. The one-dimensional diffuser 150 produces just enough diffusion in order to efficiently  
20 illuminate the light valve and not enough to introduce flare light at the image. Exemplary one dimensional diffusers include diffractive line generators, available from MEMS Optical, and elliptical holographic diffusers, available from Physical Optics Corp.

In particular, diffuser 150 is employed within the illumination  
25 optical system of the laser projection display 100 in order to reduce the source brightness (increasing lagrange). The diffuser angle  $\theta_b$  and the location of the diffuser 150 are selected accordingly. The lagrange of the system will be dominated by the product of the illumination beam profile half-width on the diffuser 150 and the half-angle of the light scattered by the diffuser 150. The  
30 desired system lagrange may be inferred from the specified image resolution, which in turn depends on the resolution of the linear spatial light modulator 200

and the imaging properties of the projection lens 205. By comparison, in the typical lamp based projector, the system lagrange will be determined by the need to maximize system light efficiency. As a result, the projection lens for the laser display may have an f-number in the  $f/7$  to  $f/15$  range instead of the  $f/3$  required by the prior art lamp based systems. The actual design target for the lens f-number will depend on the imaging criteria specified to determine the quality of the lens (for example, a Rayleigh or Sparrow imaging criteria could be applied).

As an example, the combination of a 40 mm long linear spatial light modulator 200 and an  $f/10$  projection lens 205, will specify a target lagrange of the projection system of  $\sim 1.0$  mm in the X-direction. In this example, the diffuser 150 can have a half angle  $\theta_D = 5.0^\circ$  and be placed within the illumination system such that it is illuminated by a collimated beam with 22-mm diameter. In this example, the lagrange of the laser light will be reduced from  $\sim 0.3 \mu\text{m}$  to  $\sim 1.0$  mm, and a specular  $f/10$  beam could be provided to spatial light modulator 200, assuming the intervening optical system has the proper magnification and lens structure. Thus, through the selection of the appropriate diffuser 150, the lagrange or brightness of the effective laser light source can be defined to match the needs of the optical system, thereby boosting system light efficiency and simplifying the optical design, as compared to a traditional lamp based system.

While diffuser 150 does reduce the coherence of the laser light to some extent, the laser light will remain sufficiently coherent to impart speckle into the outgoing beam. Unless this speckle is further reduced, it will be present at both the linear spatial light modulator 200 and the screen 215 as an undesired random variation in light intensity. However, the fly's eye integrator 175, which primarily provides uniform illumination to the linear spatial light modulator 200, also amplifies the effect of the diffuser 150 on de-speckling and artifact removal. This comes about by overlapping many contributions from the diffuser 150 on the linear spatial light modulator 200 and therefore in the image on the screen 215. Although the resulting speckle within the illuminating light at the linear spatial light modulator 200 and screen 215 is significantly reduced in size and magnitude compared to a similar system without the fly's eye integrator 175, this remaining



speckle can still be objectionable in critical applications. A projection display, which combines a very high to screen magnification, a high gain screen, and observers viewing the screen near the human visual acuity limits, is such a critical application.

5                   A primary purpose of the present invention is to provide a laser projection display that employs a combination of internal means to de-speckle the output of a pixilated optical system. Speckle in such a system can be reduced when adjacent pixels or groups of pixels are not perfectly in phase with one another either spatially or temporally. A locally uniform phase profile, which  
10 extends across a group of pixels, and which can exhibit speckle is shown in Fig. 5a. The present invention uses means (including electrically controllable de-speckle modulator 160) to alter the phase profile shown in Fig. 5a across an extent of the light beam such that it more closely resembles the profile shown in Fig. 5b. Fig. 5b shows a more random phase profile in which at any given instant in time  
15 adjacent regions along the x-direction see different phase profiles. Also effective, would be a geometry that provides a periodic or quasi-periodic profile as shown in Fig. 5c, which can for example originate with crosstalk between adjacent modulator sites. While periodic or quasi-periodic phase profiles reduce speckle, other undesired artifacts may be introduced by such periodic phase structures. For  
20 that reason, the preferred mode of operation according to the present invention is one creating a phase profile as seen in Fig. 5b. In a preferred embodiment of the present invention, the laser projection display 100 includes an electrically controllable electro-optic de-speckling modulator 160, having a series of modulator sites that receive control signals to provide localized random phase  
25 changes to the incident light, thereby helping to reduce speckle visibility in the images displayed by the system. It should be noted that there need not be a one to one correspondence between the pixels of the spatial light modulator in the optical system and the modulator sites of the electrically controllable de-speckling modulator 160. In fact the optical system need not be pixilated at all, and for  
30 example could use an analog medium such as film for the image modulation..

The electrically controllable de-speckling modulator 160 used in the laser display 100 of the present invention provides enough variation of phase within the light beam that the viewer or viewing system receives a reduced speckle image when the modulator is used in conjunction with an appropriate optical system. By independently electrically addressing the modulator sites, each site in the electrically controllable de-speckling modulator 160 can introduce phase delays in the light beam with respect to the neighboring sites. A different voltage or voltage duration is applied to each site (or group of sites), thus producing a phase delay corresponding to as much as several waves of propagation in the light. This variation to the phase profile significantly reduces the appearance of speckle. By picking a voltage distribution that spatially provides a perturbed phase front and varying it in time, both spatial and temporal phase variation is introduced into the light beam.

The electrically controllable de-speckling modulator 160 is included in the optical system of the laser projection display in such a manner that its' controllable spatially varying random phase profiles translate into a reduction of speckle. The electrically controllable de-speckling modulator 160 reduces speckle through a reduction of coherence, or a randomization of phase in a light beam spatially and/or temporally. The inclusion of the electrically controllable de-speckling modulator 160 in the optical system serves to effectively scramble the phase profile of a light beam by varying the refractive index profile in the medium through which light travels.

Referring to Fig. 3, there is shown a first example of an electrically controllable de-speckling modulator 160 of a type that could be used in the laser projection display of the present invention. The electrically controllable de-speckling modulator 160 is a patterned device including a collection of addressable modulator sites that produce controlled time or phase delays with respect to adjacent pixels in accordance with signals, or data provided to individual modulator sites. Commonly-assigned co-pending USSN 09/924,619, filed August 8, 2001, by Ramanujan et al, describes the design and operation of de-speckling modulators in greater detail than provided here.

The electrically controllable de-speckling modulator 160 comprises a bulk electro-optic substrate 370 with a series of individual modulator sites 350, 355, 360, etc. Each modulator site 350 has a delay region 380 through which a beam of light 320 encounters a time or phase delay in relation to the electric field applied between top electrode 385 and bottom electrode 400. Beam of light 320 enters bulk electro-optic substrate 370 through an input facet 340, after which it traverses the modulator, and exits through output facet 345.

The choices of electro optic materials from which to build the electrically controllable de-speckling modulator are numerous and include Lithium niobate, lithium tantalate and PLZT. For the sake of simplicity, further discussion of the parameters for the electrically controllable de-speckling modulator will center around the use of lithium tantalate illuminated at 633 nm, but it should be understood the geometry is applicable to a variety of materials and illumination wavelengths. If a different material is employed, care must be taken to ensure the correct axes are employed. For example, use of PLZT in such a device design can produce orders of magnitude greater phase delay along a modulator site due to the larger electro-optic coefficient. However, the crystal must be oriented in a manner such that the applied electric field interacts with the optical field through the appropriate axes of the crystal.

In the case of lithium tantalate, the geometry represented here is shown as y-cut, meaning that light propagates along the y-direction and electric field is applied along the z-direction. For best results, the light traveling through the modulator is polarized along the x-direction (transverse direction). For the purposes of the electrically controllable de-speckling modulator discussions, light propagation direction will be referred to as the c-axis so that there is no confusion between the crystal axis and the propagation axis. (Note : Figs. 3, 4, and 6 use the standard coordinate system for electro-optic crystals, whereas Figs. 1, 2, 8, 9, and 10 use a typical optical coordinate system, with light propagation along the z-axis.) Other cuts and geometries of the crystal maybe employed, but in this first example, y-cut is optimal.

Fig. 4 shows a cross section of the electrically controllable de-speckling modulator 160 with a beam of light 320 propagating along the y-axis of the modulator. It may be advantageous for the input and output facets of the modulator to be antireflection coated. Furthermore, since the device effectively  
 5 perturbs phase fronts, it should be recognized that input light to the modulator can come from a variety of sources simultaneously. The electrically controllable de-speckling modulator 160 may operate on several wavelengths and angular extents simultaneously.

A single modulator site can be defined as the region between top  
 10 and bottom electrodes 385 and 400. A ray of light, as defined along the x-direction of Fig. 3 propagates along the crystal between top and bottom electrodes 385 and 400. Light passing through that region acquires a phase change  $\Delta\phi$  defined as follows:

$$\Delta\phi = (\pi/\lambda) n^3 r_{33} l V/d \quad (1)$$

15 As is seen in Eq. 1, the phase change  $\Delta\phi$  is a function of applied voltage V, length of propagation l, distance between electrodes d, wavelength of light  $\lambda$ , refractive index n, and the  $r_{33}$  coefficient for y-cut Lithium tantalate. Given reasonable fabrication parameters such as propagation lengths from 5-50 mm, thickness of 500  $\mu\text{m}$ , and illumination wavelength in the red spectrum, phase  
 20 delays of as much as several wavelengths can be generated for operating voltages between 0V and 160V. Understandably, all the input parameters can be altered to render more or less delay along a given channel or modulator site. All delays have been represented by distance or number of waves. It is equivalent to discuss delay as a time delay given by the distance of delay divided by the propagation  
 25 velocity of the light in the medium.

Referring back to Fig. 3, a plurality of modulator sites 350, 355, 360 is defined by several regions such as the one shown in cross section in Fig. 4. A top electrode 385 and bottom electrode 400 defines each modulator site. It may be useful on fabrication to have a common unpatterned electrode on one side of  
 30 the device as opposed to patterning both the top and bottom of the device. This allows modulation through differential voltage applied to the electrodes on one

side of the device. The de-speckling modulator is electrically controllable in the sense that the device consists of a series of modulator sites which are addressed by a patterned electrode structure, and which can respond individually or in groups, to pre-determined applied control signals. Each modulator site can be operated  
5 independently through means of different applied voltages, different address times, or combinations of both. The electrically controllable de-speckling modulator 160 can be used as either an analog voltage driven modulator, a pulse width modulated device, or a combination of both. The control signals applied to the de-speckling modulator could also be derived from a feedback loop, which  
10 monitored the reduction of speckle visibility or contrast, and then adjusted to drive signals to maintain or further reduce speckle magnitude. The width of any given electrode along the x-direction can be anywhere from sub-wavelength in width to literally millimeters in width.

It may be of use to periodically switch the polarities of the top and  
15 bottom electrodes, or to introduce a blanking pulse. Such bi-polar operation allows dissipation of space charge in the bulk electro-optic substrate 370. Furthermore, because the operational voltages can be quite high and because the optical field may not be well contained, the electrodes may be patterned with material such as SiO<sub>2</sub> under the electrode to act as a buffer layer 405 (see Fig. 4).  
20 Also, an overcoat 410 of acrylic or other insulating material may be applied to prevent arcing in air.

The device structure provided for the electrically controllable electro-optic de-speckling modulator 160 of Figs. 3 and 4 is only one example of this type of de-speckling modulator that could be used in a laser projection  
25 display. A second such example is shown in cross section in Fig. 6a, where each modulator site consists of a series of electrodes 420-435 spaced along the y-axis of the crystal. A modulator site can be activated using all or a subset of the electrodes, for instance electrodes 420, 425, and 430, thus providing variable delay even with a single drive voltage. Each electrode (which have distinct  
30 lengths) can be driven such that the applied voltage in conjunction with the electrode length can give different known fractions of wavelength delay. For

instance, the first electrode may produce a  $1/8$  wavelength delay, the second  $1/16$ , the third  $1/32$ , and so forth. The applied voltage can be adjusted such that the same length of electrode renders the same number of wavelengths delay for different wavelengths of light. Additionally the electrodes can be modulated in  
5 time individually within each modulator site thus further randomizing the phase.

Another example of an electrically controllable de-speckling modulator useful in a laser projection display, is shown in Fig. 6b. The modulator has added complexity, but greater control as compared to that shown in Fig. 6a. Fig. 6b has different local electrode geometries between adjacent modulator sites.  
10 By spacing electrodes 390, 392, 395 within a modulator site (350 for example) and staggering electrodes 390, 397, 399 between adjacent/nearby modulator sites, the modulator is less prone to electrical cross talk effects shown in Fig. 5c. Similar results can be achieved by allowing space between electrodes both between adjacent modulator sites 350, 355, 360 as well as within a single site 350.  
15 On the other hand, as the electrically controllable de-speckling modulator is fundamentally a phase scrambler, intended to randomly alter the phase fronts of the incident light in localized areas, the introduction of cross talk between modulator sites can help the intended result by introducing further phase variations. In the event that the designer wishes to contain cross talk effects, the  
20 electrodes will need sufficient gaps between them to prevent cross talk. It should be understood that there are other exemplary structures for the electrically controllable de-speckling spatial light modulator, beyond those depicted in Figs. 3, 6a and 6b, which could be conceived of, and which could be used within a laser projection display 100 according to the present invention.

25 Because the appearance of speckle can be reduced both by spatial variations to the lateral phase profile or by time variations between adjacent regions, the operation of the electrically controllable de-speckling modulator can be modified to accommodate both. In the first case, a lateral electric field distribution is established as a function of address to the electrodes. This  
30 distribution, in turn, defines a lateral phase perturbation. In the case of temporal variation, the same field profile may be employed at different sites. However, in

time, the relative fields are varied such that adjacent regions are out of phase with each other. Ideally, a combination of both methods of operation, as shown in Fig. 5d, provides the best result.

An electrically controllable de-speckling modulator 160 can  
5 function to distort or scramble the phase fronts of the incident light.  
Conceptually, this effect is illustrated in Figs. 7a and 7b for the case of collimated light, with planar parallel wave fronts 325 directed at normal incidence onto the modulator 160. As illustrated in Fig. 7a, zero drive voltage is applied to the  
10 modulator 160, and the wave fronts 325 emerge unaltered. As illustrated in Fig. 7b, voltages are applied to the modulator sites 350, and distorted wave fronts 330 emerge from the device. Figs. 7c and 7d illustrate the equivalent cases, where an electrically controllable de-speckling modulator 160 is located in convergent space within an optical system. It should be understood that these wave front distortions are exaggerated in extent and only representative of the general  
15 concepts. They are not necessarily depictions of wave fronts located  $1\lambda$  apart.

While an electrically controllable de-speckling modulator 160 can distort wavefronts by providing spatial and temporal phase perturbations, the ability of the modulator to affect the appearance of speckle also depends on the design of the system in which it is used. The present invention predominately  
20 considers the case where the electrically controllable de-speckling modulator provides a small delay along a modulator site compared to the coherence length ( $\Delta\phi \ll C_L$ ) of the light source. Indeed, lasers can have coherence lengths ranging from fractions of a mm to several meters in extent (0.1-5.0 mm for Red/Green/Blue optical parametric oscillator type lasers), whereas, the lithium  
25 tantalate based de-speckle modulator will only provide a few waves of delay. Thus, as previously stated, this device can be used to cause time variant wave front distortions or aberrations, but not to directly alter the spatial or temporal coherence in an appreciable way. Fortunately, the time and space variable phase can be used to vary or average the speckle within the projected image, thereby  
30 reducing the perceptibility of the speckle if the variations are more rapid than the response time of the human eye.

On the other hand, an electrically controllable de-speckling modulator could be used in a system where the provided phase delay is on the same order as the coherence length of the light source ( $\Delta\phi \sim C_L$ ). For example, the typical white light source, such as an arc lamp, emits light with a coherence length  $C_L$  and width only several wavelengths in extent, which is comparable to the phase delay from the lithium tantalate based device. Alternately, an electrically controllable de-speckling modulator with about 1.0 mm of delay, could be paired with a small coherence length laser (such as an OPO type laser), to again basically match delay and coherence length ( $\Delta\phi \sim C_L$ ). In such cases, the electrically controllable de-speckling modulator can be used in various ways within the optical system to alter both the spatial and temporal coherence directly. If the controllable phase delay significantly exceeds the coherence length of the light from the light source ( $\Delta\phi \gg C_L$ ), even more dramatic effects can be realized with an electrically controllable de-speckling modulator 160.

The effectiveness of the electrically controllable de-speckling modulator 160 in reducing speckle visibility depends both on the structure and performance of the specific device (Figs. 3, 6a and 6b show such exemplary devices) and the manner in which it is used within laser projection display 100. In particular, an electrically controllable de-speckling modulator 160 may be located prior to the first lenslet array 178a of fly's eye integrator 175 as depicted in Figs. 1 and 2a, or within fly's eye integrator 175 as depicted in Fig. 2b, or similarly after the second lenslet array 178b of fly's eye integrator 175. In the typical fly's eye integrator based optical system used to illuminate a one dimensional device (spatial light modulator 200), the number (N) of lenslets in each lenslet array (178a and 178b) is relatively small, with ~ 6-20 lenslets providing adequate light uniformity. By comparison, the typical spatial light modulator 200, will be an array comprising a relatively high number (M) of tightly packed pixels, with between 256 to 4096 pixels serving most applications. The number (P) of modulator sites in the electrically controllable de-speckling modulator 160 of Figs. 1 and 2 is determined by their effectiveness in reducing speckle visibility,



and is not tightly dependent on either the number (N) of lenslets or the number (M) of modulator pixels.

Assuming that electrically controllable de-speckling modulator 160 is operating under the condition that the phase change or delay it introduces is small relative to the coherence length ( $\Delta\phi \ll C_L$ ) of the laser light beam (a few wavelengths vs. a few mm), then electrically controllable de-speckling modulator 160 can be used to locally alter the wavefronts of the light beams, as in Figs. 7a-d. In this case, there will be many modulator sites per lenslet ( $P \gg N$ ). In order to modify (distort) the wavefronts of imaging beams of lights within the illumination system, electrically controllable de-speckling modulator 160 is used in the far field of the imaged plane (or in one of its conjugate planes). Thus, in the Fig. 1 system, where electrically controllable de-speckling modulator 160 is located prior to the first lenslet array 178a, and where this lenslet array is image conjugate to the spatial light modulator 200, electrically controllable de-speckling modulator 160 is minimally offset from the lenslet array by more than the depth of focus (DOF), and is optimally in the far field of this conjugate plane (approximately  $>10 \times \text{DOF}$ ).

Similarly, as shown in Fig. 2b, if electrically controllable de-speckling modulator 160 is located between first lenslet array 178a and second lenslet array 178b, and in proximity to second lenslet array 178b, then electrically controllable de-speckling modulator 160 is by definition located in the far field of the first lenslet array, and can therefore phase alter the wavefront structure. As the optical system can deliberately be designed to have the light underfill the lenslets of the second lenslet array 178b, the required fill factor for the electrically controllable de-speckling modulator 160 can be reduced, which may permit alternative and less demanding electrode addressing schemes to the modulator sites. Similarly, electrically controllable de-speckling modulator 160 could be located after second lenslet array 178b, and most likely between second lenslet array 178b and condenser lens 185. For these various cases, the wavefront aberrations induced by electrically controllable de-speckling modulator 160 mostly effect the localized interference of wavefronts which contributes to the

creation of speckle. This configuration may also effect the quality of the imaging provided by the beam shaping optics, thereby causing some softness at the edges of the illuminated area.

Alternately, for this same case where the electrically controllable de-speckling modulator 160 provides phase changes or delays which are small relative to the coherence length ( $\Delta\phi \ll C_L$ ) of the laser light, the electrically controllable de-speckling modulator can be positioned within the optical system to act more like a diffuser which scatters or diffracts light, rather than altering the imaging wavefronts within the illumination system. In this case, the number of modulator sites is large compared to the number of lenslets ( $P \gg N$ ), and the electrically controllable de-speckling modulator 160 is located in the near field of the imaging plane within the illumination system. That is, electrically controllable de-speckling modulator 160 is nominally located just before or just after first lenslet array 178a, and should be nominally within the near field ( $< 10 \cdot \text{DOF}$ ) of the conjugate image plane (conjugate to the image plane at spatial light modulator 200).

If, on the other hand, it is assumed that electrically controllable de-speckling modulator 160 is operating under the condition that the phase change or delay it introduces is on the same order as the coherence length ( $\Delta\phi \sim C_L$ ) of the light from the laser source 110, then the device can directly effect the relative temporal coherence of the light for one light beam relative to another. In this case, if the number of modulator sites is identical to the number of lenslets ( $P=N$ ), and the modulator sites are aligned to correspond to a given lenslet of lenslet array 178a, the temporal coherence is altered for the light beam transiting a given lenslet and modulator site, relative to the others. Each beam will create its own speckle pattern within the illuminated area at spatial light modulator 200, but the ensemble speckle will vary in time as the modulator sites are randomly driven. In this case, electrically controllable de-speckling modulator 160 can be located prior to first lenslet array 178a, but without any strict far field or near field positional restriction. Likewise, electrically controllable de-speckling modulator 160 can be located between the first lenslet array 178a and second lenslet array 178b, or just

after second lenslet array 178b. This configuration would work even better if the phase delay is significantly (2x-3x or more) larger than the coherence length ( $\Delta\phi > C_L$ ).

Alternately, an electrically controllable de-speckling modulator  
5 160, operating under the condition that the phase change or delay it introduces is on the same order as the coherence length ( $\Delta\phi \sim C_L$ ) of the light from the laser source 110, such that the electrically controllable de-speckling modulator can directly effect the relative temporal coherence of the transiting light, can be provided within laser display 100 with a number (P) of modulator sites greater  
10 than the number (N) of lenslets ( $P > N$ ). In this case, the electrically controllable de-speckling modulator can be used to randomize the coherence spatially across each lenslet array, and thus across the spatial light modulator 200 and screen 215. In this example, electrically controllable de-speckling modulator 160 is not used to alter the wavefronts with small phase aberrations, but to alter the coherence of  
15 one spatial area relative to another, and effectively synthesize a nearly incoherent source. If the number of modulator sites is modestly greater than the number of lenslets ( $P = 8 * N$  for example), the electrically controllable de-speckling modulator 160 can be located prior to first lenslet array 178a, but without any strict far field or near field positional restriction (as long as the modulator sites are not small  
20 enough to diffract, scatter, or diffuse appreciable light). In this case, the beam of light passing through each lenslet is split into relatively large adjacent regions, with the temporal coherence varying amongst the regions. However, if there are many modulator sites relative to the number of lenslets ( $P \gg N$ ), such that the electrically controllable de-speckling modulator 160 functions more like a  
25 diffuser, then de-speckling modulator 160 should be located in the near field of first lenslet array 178a. In that case, electrically controllable de-speckling modulator 160 may be located just before or just after lenslet array 178a, and should be nominally within the near field ( $< 10 * \text{DOF}$ ) of the conjugate image plane (conjugate to the image plane at spatial light modulator 200). These  
30 configurations would work even better if the phase delays provided by de-speckle

modulator 160 are significantly (2x-3x or more) larger than the coherence length ( $\Delta\phi > C_L$ ).

In summary, laser display system 100 is designed to provide a projected image on a distant screen 215 that is free from perceptible speckle, by  
5 using a combination of speckle reduction/de-correlation techniques. The use of diffuser 150 not only re-defines the effective lagrange or etendue of the light, but also breaks the coherent incident beam into a multitude of smaller, less spatially coherent wavefronts. Thus use of a light integrating system, such as fly's eye integrator 175, which divides the light into beamlets which are reimaged to create  
10 a uniform area of illumination, also provides further speckle reduction by overlapping the many local contributions from the diffuser across the screen. Finally, the use of electrically controllable de-speckling modulator 160 provides means to disrupt the local phase of portions of the illuminating light, relative to other portions of the illuminating light, thereby altering the local spatial and/or  
15 temporal coherence relationships. This allows either the local wavefront phase structures, the temporal coherence relationships between wavefronts, or the temporal coherence across spatial areas to be altered. Furthermore, it should be noted that speckle reduction in laser display 100 could have diffuser 150 attached to a motion mechanism, which imparts a linear, rotary, or random motion to the  
20 diffuser, such that the diffuser 150 moves by at least the characteristic feature size of the diffusing surface. The frequency of the motion must be faster than the flicker frequency ( $> 40$  Hz). Speckle visibility is then further reduced by decorrelating the speckle pattern by time averaging the position and magnitude of the speckle in local areas across the full spatial extent of the image.

25 Depending on its construction and operation, the electrically controllable de-speckling modulator 160 may impart sufficient phase perturbations, such as diffraction or scatter, to the light beam to actually cause the source lagrange or etendue to be measurably increased. In the case of projection systems designed with a linear spatial light modulator 200 requiring a relatively  
30 coherent illumination in the array direction, a small change in source lagrange provided by the electrically controllable de-speckling modulator 160 may be

sufficient to meet the imaging requirements of the projection system. In that case, the laser display system 100 may be constructed without a diffuser 150.

It also should be understood that the cross array optics in Figs. 1 and 2a show a simplified optical system with just one cylindrical lens, cross array condenser 195. Cross array condenser 195 conditions the light beam in the cross array direction, to optimize it for interaction with linear spatial light modulator 200. It should be understood that multiple cylindrical lens elements could be used for this beam conditioning. It should also be understood that some of the lens elements within laser projection system 100 prior to linear spatial light modulator 200 could be spherical, and shape both the array and cross array beams. Likewise, projection lens 205 could also include cylindrical lenses (not shown), to provide further control of either the array direction or cross array direction spot formation at the screen 215. Similarly, it should be understood that cross array optics (not shown) could be provided prior to electrically controllable de-speckling modulator 160 to pre-condition the light beam so as to optimize the interaction of the light through the electrically controllable de-speckling modulator. In that case, cross array condenser 195 or equivalent would adapt the cross array light beam exiting electrically controllable de-speckling modulator 160 to optimize it for input to linear spatial light modulator 200. It should also be understood that alternate beam homogenizing optics to the fly's eye integrator could be used. In particular, an integrating bar/kaleidoscope, much as described in (Moulin patent), could be used within an alternate design for the beam shaping optics 170, and provide both uniform illumination, as well as a contributory effect to speckle reduction in cooperation with diffuser 150 and electrically controllable de-speckling modulator 160.

An alternate construction for laser projection display 100 is shown in Fig. 8, in which a beamsplitter array 240 is used to provide optical path delay differences so as to reduce the coherence of the composite laser beam 250. Beamsplitter array 240 comprises an arrangement of (R) partially reflecting mirrors, which create a series of beamlets 245 with optical path length differences ( $\Delta d$ ) between adjacent beamlets 245 that are on the order of the coherence length

- 27 -

of the laser or larger. Optimally the optical path differences ( $\Delta d$ ) are on the same order of size as the coherence length  $C_L$  of the laser 110. The mirrors of beamsplitter array 240 would be partially transmitting, and partially reflecting, with the reflectivity increasing progressively from the first mirror (241a) to the last mirror (241e). Although beamsplitter array 240 is illustrated as an array of mirrors, prism arrays and other structures could be used. Beamsplitter array 240 effectively works as a beam expander, using the R beamlets to create a composite laser beam 250. However, as the R beamlets travel different optical path lengths ( $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3$ , etc...) which are comparable to the coherence length  $C_L$ , the temporal coherence of the light will vary across the spatial extent of composite laser beam 250. Ideally, each of the R beamlets 245 are temporally incoherent relative to the others. However, the scheme is still useful even if the temporal coherence changes more slowly, such that groups of beamlets 245 are coherent to each other, as these groupings will tend to change randomly in time, as the coherent emissive state of the laser 110 fluctuates in time.

As the typical laser beam 115 has a non-uniform light intensity profile (a Gaussian profile being common), each of the beamlets 245 will also be non-uniform, and composite laser beam 250 will be non-uniform as well. As with the Fig. 1 system, diffuser 150 is inserted to change the effective source lagrange or etendue to match the imaging requirements. Diffuser 150 also helps to make composite laser beam 250 somewhat more uniform and less coherent. Again as previously, a fly's eye integrator 175 is used to both improve the illumination uniformity and reduce speckle visibility at spatial light modulator 200. However, in this case, first lenslet array 178a is designed to have each beamlet 245 illuminate M lenslets, so that each beamlet 245 is transformed into uniform illumination at the light valve. Thus there are a total of at least  $M \times R$  lenslets in each lenslet array 178a and 178b. The effect at the screen 215 is that each of the R laser beams will produce their own fine speckle pattern dictated by the diffuser, the M fly's eye lenslet pairs used by a given beam, and the screen. The  $M \times R$  speckle patterns will add incoherently to produce an overall averaging even without the use of electrically controllable de-speckling modulator 160 or the

motion of diffuser 150. Although in some less critical applications, this degree of speckle reduction may be sufficient, for critical applications, laser display system 100 of Fig. 8 is further improved with the addition of electrically controllable de-speckling modulator 160. As the temporal coherence within composite laser beam

5 250 is already significantly variable, electrically controllable de-speckling modulator 160 can be used to alter the phase wavefronts within the beamlets 245, assuming the applied phase change is small relative to the coherence length ( $\Delta\phi \ll C_L$ ). As with the prior discussion, electrically controllable de-speckling modulator 160 can be positioned (see Fig. 8) within laser display 100 in advance

10 of first lenslet array 178a, such that it is in the far field (well outside the depth of focus (DOF)) of the conjugate image plane of beam shaping optics 170. Similarly, as previously, electrically controllable de-speckling modulator 160 can be located in the downstream far field of the conjugate image plane, in proximity to second lenslet array 178b, either before as in Fig. 2b, or after. Alternately, if

15 electrically controllable de-speckling modulator 160 provides phase changes comparable to the coherence length ( $\Delta\phi \sim C_L$ ), the modulator can be used to vary the temporal and spatial coherence across regions within each of the M lenslets, where these regions are relatively large compared to the wavelength of light (to neither scatter nor diffuse).

20 Thus far, this invention for a laser display system utilizing both an electrically controllable de-speckling modulator and a spatial light modulator for imparting image data, has been described with respect to the use of one dimensional light modulators. There are a wide variety of two dimensional (area) spatial light modulators which can be used in electronic projection systems, with

25 liquid crystal light valves (LCDs) and micro-mechanical mirror arrays (including the digital mirror devices (DMDs) from Texas Instruments) being the most prominent. Relative to the laser display system of Fig. 1, the primary impact of switching from a one dimensional spatial light modulator to a two dimensional type, is that both the illumination optics and the electrically controllable de-

30 speckling modulator 160 must be modified to work two dimensionally. In that case, the fly's eye integrator 175 typically use fly's eye lenslet arrays 178 (a,b)

laid out in a two dimensional pattern, where the lenslets have spherical surfaces. Likewise, diffuser 150 provides controlled two dimensional (or spherical) diffusion, rather than the one-dimensional diffusion preferred in the Fig. 1 linear system. Such diffusers are available as holographic diffusers from Physical  
5 Optics Corp. or a randomized microlens array from Corning - Rochester Photonics Corp.

The various examples of spatial light electrically controllable de-speckling modulator 160 detailed in Figs. 3, 4, 6a and 6b are one dimensional or linear devices. It is possible to construct a two dimensional electrically  
10 controllable de-speckling modulator by stacking a series of these devices, or by placing a series of these devices in offset locations within the optical system. It should also be understood that other types of electrically controllable de-speckling modulators can be designed, which use other electro-optical materials more conducive to use as a two dimensional structure, which could then be placed in a  
15 laser display system with a two dimensional image modulating spatial light modulator array.

For example, Fig. 9 shows a cross sectional view of a laser projection display 100 using an area type modulator array, such as an LCD. As before, laser 110 emits a laser beam 115 which is pre-conditioned by beam  
20 expansion optics 120, diffuser 150, and beam shaping optics 170 to illuminate a spatial light modulator (liquid crystal display 255). And as previously, diffuser 150, fly's eye integrator 175, and electrically controllable de-speckling modulator 160 all contribute to reduce the presence of speckle across two dimensions at the spatial light modulator and at the screen 215. Unlike the system of Fig. 1, in the  
25 system of Fig. 9, a two dimensional on screen image is not formed by scanning, but by using projection lens 205 to directly image the spatial light modulator (liquid crystal display 255) to the screen 215. The illumination light passes through a pre-polarizer 260, and a polarization beam splitter 265. Liquid crystal display 255 modulates the illuminating light, rotating the polarization state of this  
30 light on a pixel by pixel basis, according to the applied command signals. Modulated image bearing light beam 275, which is directed to the screen 215 by



projection lens 205, is formed by polarization rotated light which reflects off polarization beam splitter 265. Nominally polarization analyzer 270 is used in a crossed orientation, to define the dark state. As the typical laser source emits polarized light, it may not be necessary to utilize pre-polarizer 260 in the laser display 100 of Fig. 9. In this case, it would be necessary that laser beam 115, as emitted by laser 110, be sufficiently polarized (100:1 for example), and that neither diffuser 150 or electrically controllable de-speckling modulator 160 significantly degrade this innate polarization contrast.

Similarly, Fig. 10 shows a cross-sectional view of a laser projection display using a micro-mechanical mirror array 280, such as the DLP chip available from Texas Instruments. Unlike systems using a liquid-crystal spatial light modulator, which rely on controlled polarization effects to modulate the light, the micro-mechanical mirror array 280 utilizes angular control of the beamlets of light on a pixel-by-pixel basis. This system is substantially the same as the system shown in Fig. 1, except the illumination converges to an aperture 290 beyond the micro-mechanical mirror light array 280. Individual pixels are formed by micromirrors that either direct light through the aperture 290 of the projection lens 205, or toward a stop 285 (i.e. a Schlieren optical system). Pixel brightness is controlled by selecting the proportion of time within a frame that light is directed through the lens aperture 290. This type of system can be constructed either with a two dimensional spatial light modulator array, a 2D fly's eye system, and a 2D electrically controllable de-speckling modulator 160 as in Fig. 10, or alternately with a 1D spatial light modulator array, a 1D fly's eye system, a 1D electrically controllable de-speckling modulator 160, and a scanner, such as the galvanometer used in Fig. 1.

For simplicity, the invention has been demonstrated with a single laser beam and single spatial light modulator, although the broader discussion has been directed towards a full color RGB projection display. It should be understood that a system can be constructed with separate red, green, and blue light beams which follow separate optical paths to illuminate the respective red, green, and blue spatial light modulators. The modulated light beams would be

color combined, typically by an x-prism located before the projection lens, and the resulting light beam would be imaged to the screen to provide a polychromatic image. The separate red, green, and blue beams can originate from three separate lasers, from one OPO type laser package using a combination of non-linear optics  
5 to output three beams, or from an OPO type laser package integrated to provide a single white light laser beam output, which is subsequently color split.

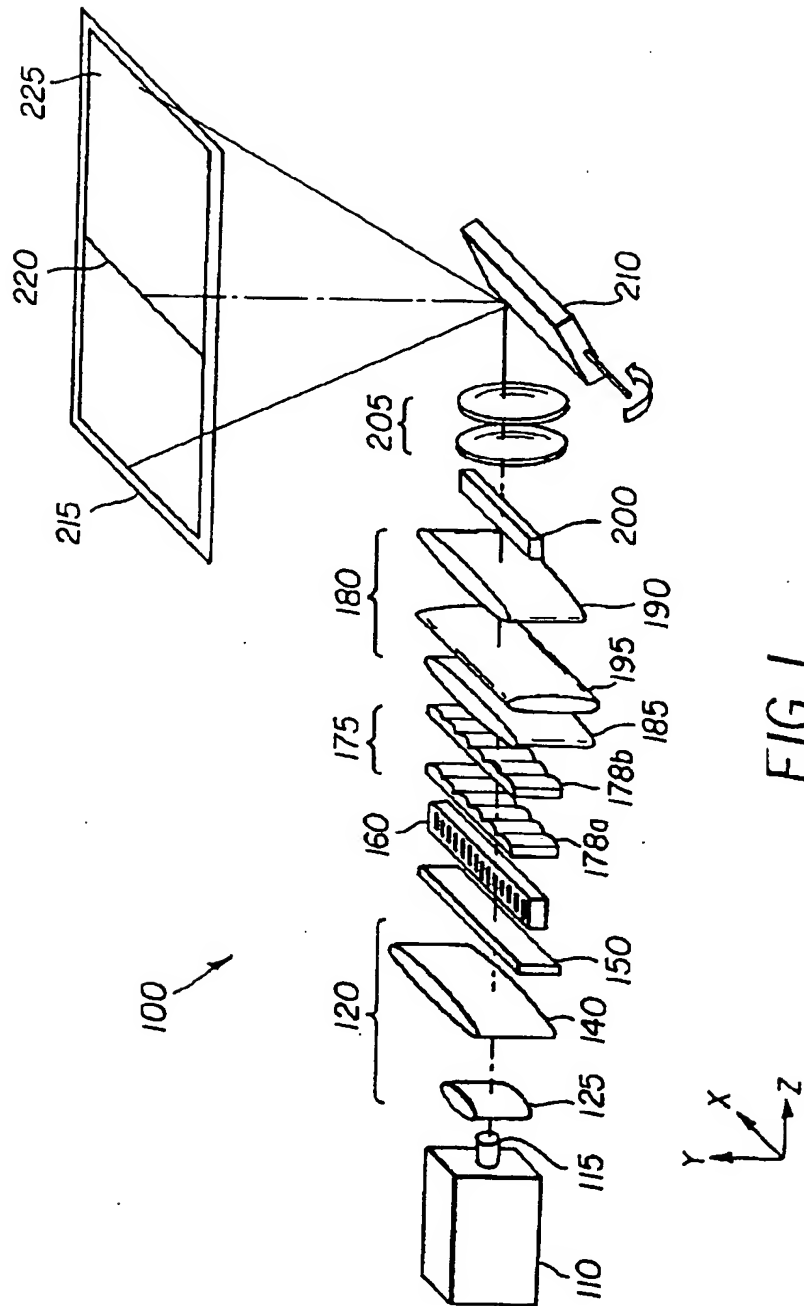
## PARTS LIST

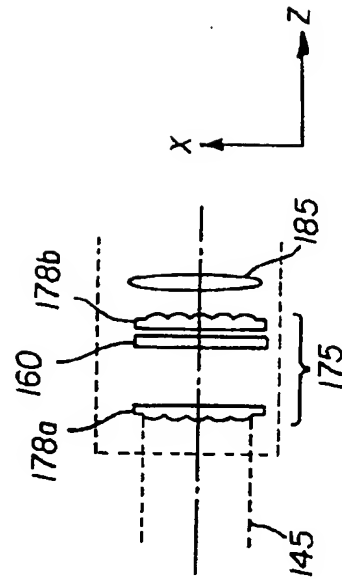
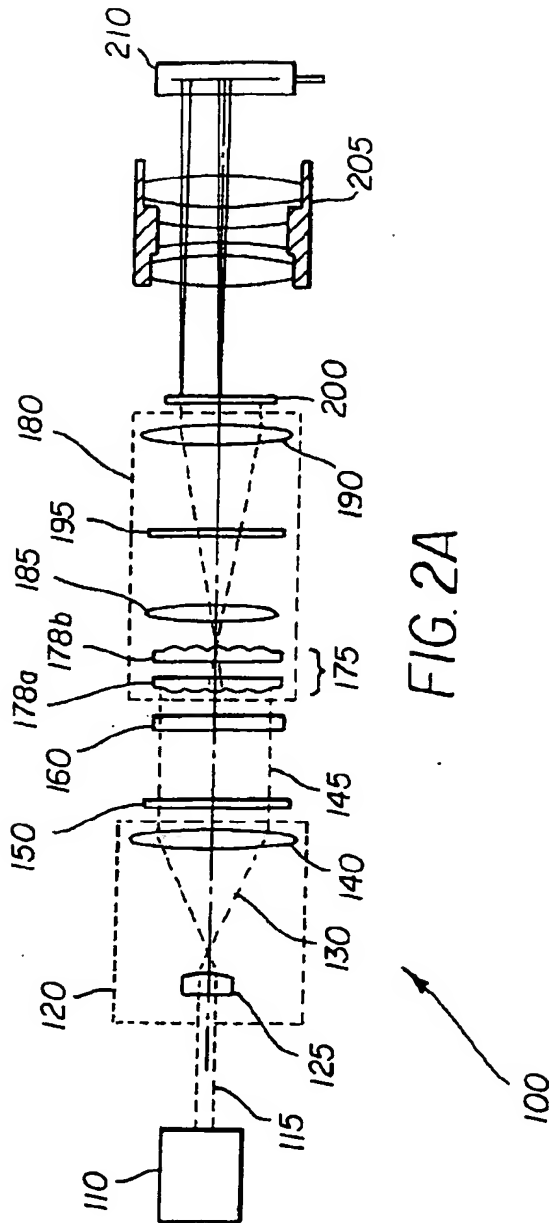
100	laser display system
110	laser
115	laser beam
120	beam expansion optics
125	diverging lens
130	diverging beam
140	collimating lens
145	collimated beam
150	diffuser
160	electrically controllable de-speckling modulator
175	fly's eye integrator
178a	first lenslet array
178b	second lenslet array
180	beam shaping optics
185	condenser lens
190	field lens
195	cross array condenser
200	linear spatial light modulator
205	projection lens
210	galvanometer mirror
215	screen
220	line image
225	area image
240	beamsplitter array
241(a-e)	mirrors
245	beamlets
250	composite laser beam
255	liquid crystal display
260	pre-polarizer

265	polarization beam splitter
270	polarization analyzer
275	modulated image bearing light beam
280	micro-mechanical mirror array
285	stop
290	aperture
320	light
325	wave front
330	distorted wave front
340	input facet
345	output facet
350	modulator site
355	modulator site
360	modulator site
370	bulk material or substrate
380	delay region
385	top electrode
390	electrode
392	electrode
395	electrode
397	electrode
399	electrode
400	bottom electrode
405	buffer layer
410	overcoat
420	electrode
425	electrode
430	electrode
435	electrode

**WHAT IS CLAIMED IS:**

1. A display apparatus, comprising:
  - a) a laser light source for emitting a light beam having a coherence length;
  - b) a beam expander for expanding the light beam;
  - c) a spatial light modulator;
  - d) beam shaping optics for shaping the expanded laser beam to provide uniform illumination of the spatial light modulator, the beam shaping optics including a fly's eye integrator having an array of lenslets;
  - e) a diffuser located in the light beam between the laser light source and the beam shaping optics;
  - f) an electrically controllable de-speckling modulator for modifying the temporal and spatial phase of the light beam; and
  - g) a projection lens for producing an image of the spatial light modulator on a distant screen.





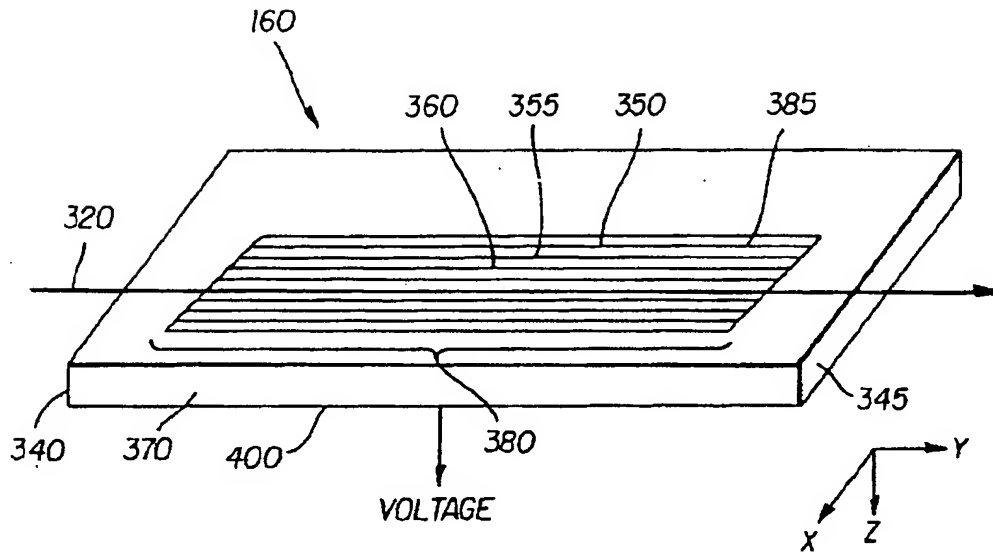


FIG. 3

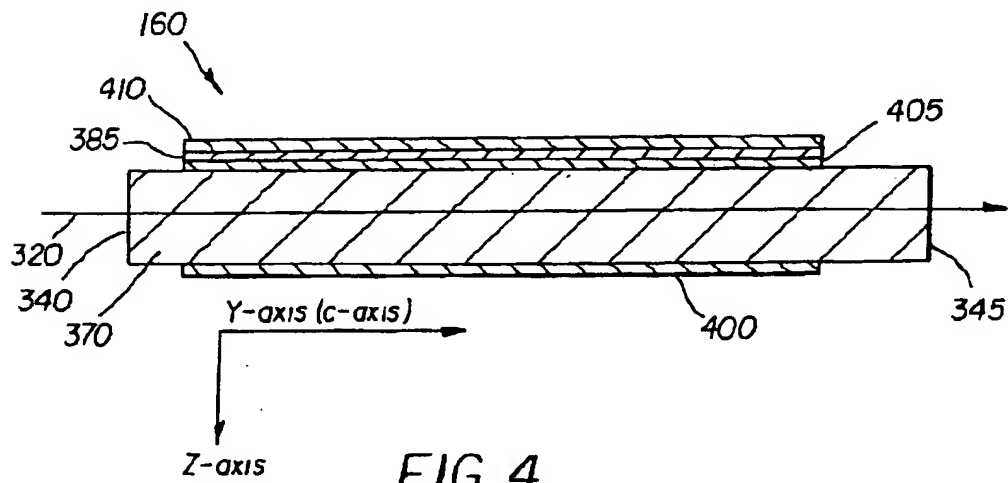


FIG. 4



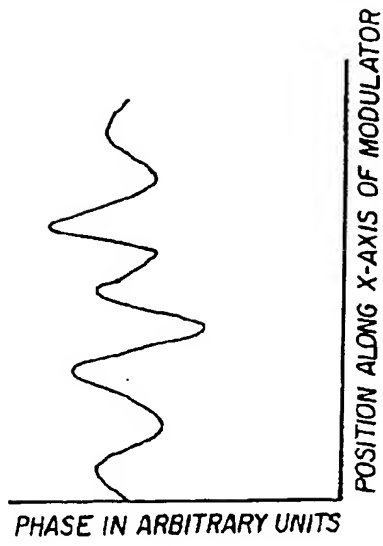
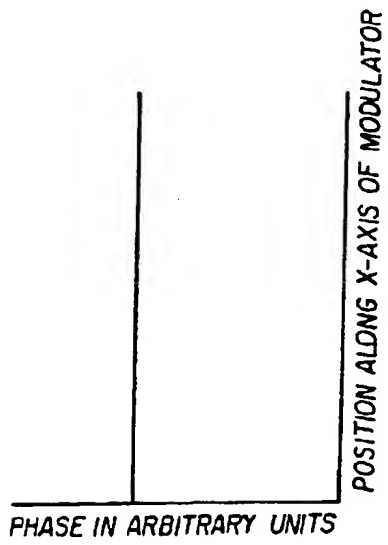


FIG. 5A

FIG. 5B

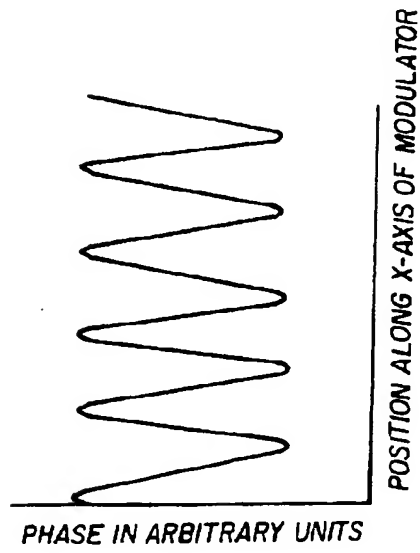
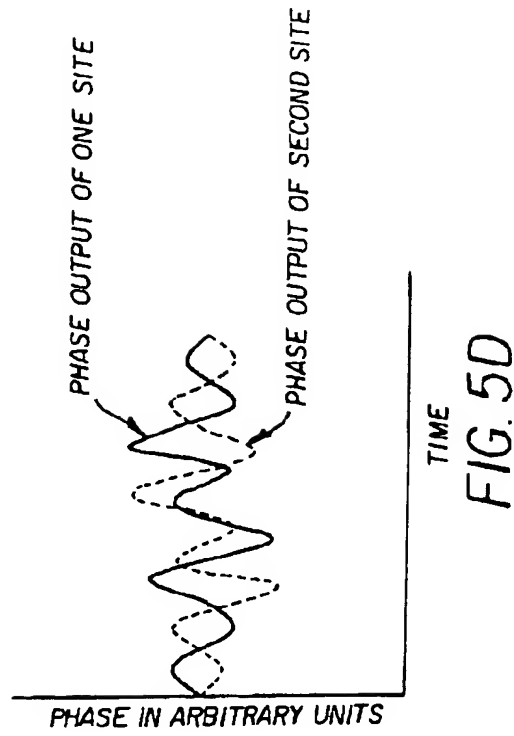
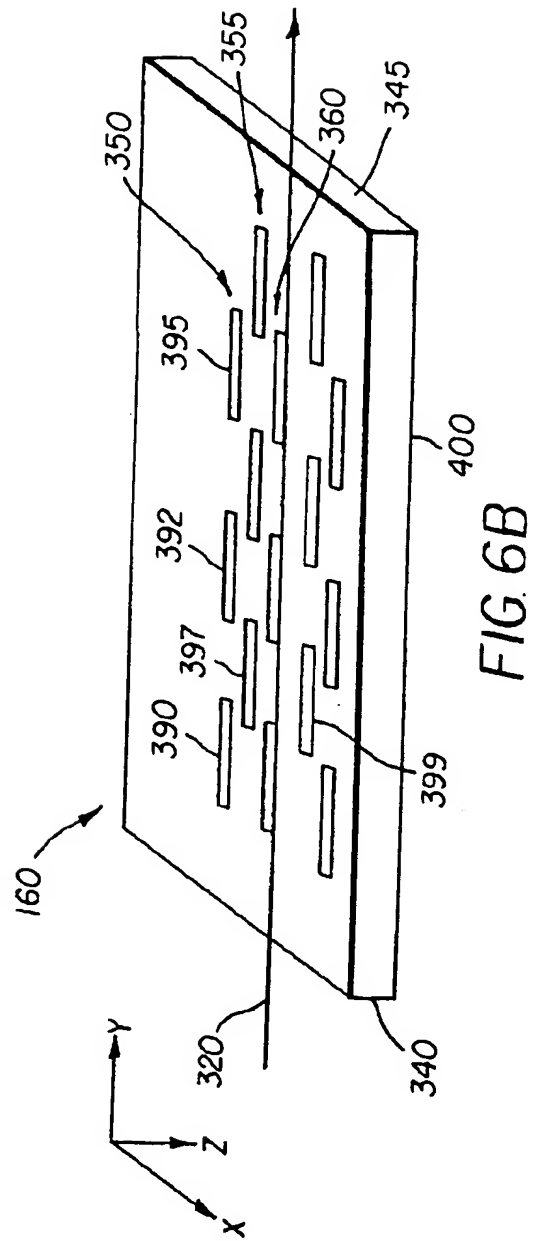
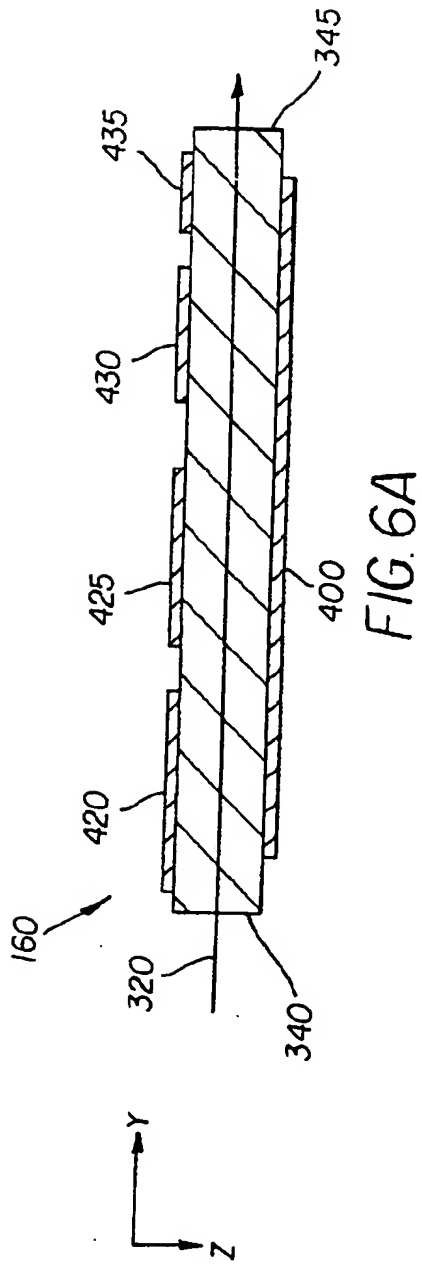


FIG. 5C



TIME

FIG. 5D



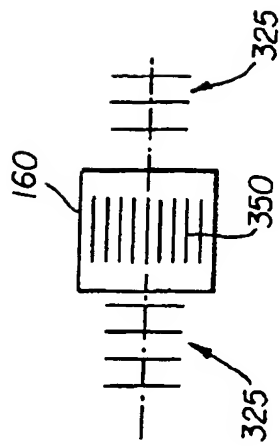


FIG. 7a

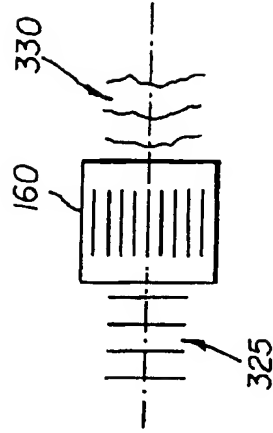


FIG. 7b

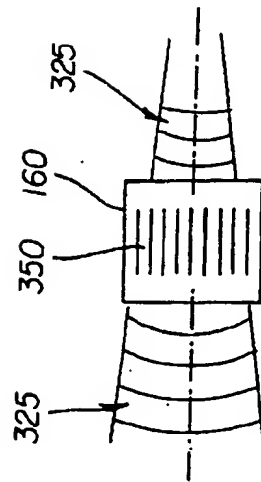


FIG. 7c

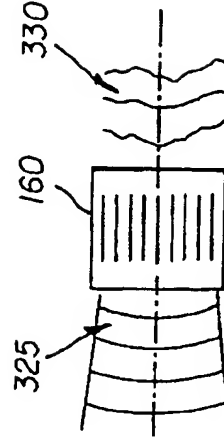


FIG. 7d

(60)

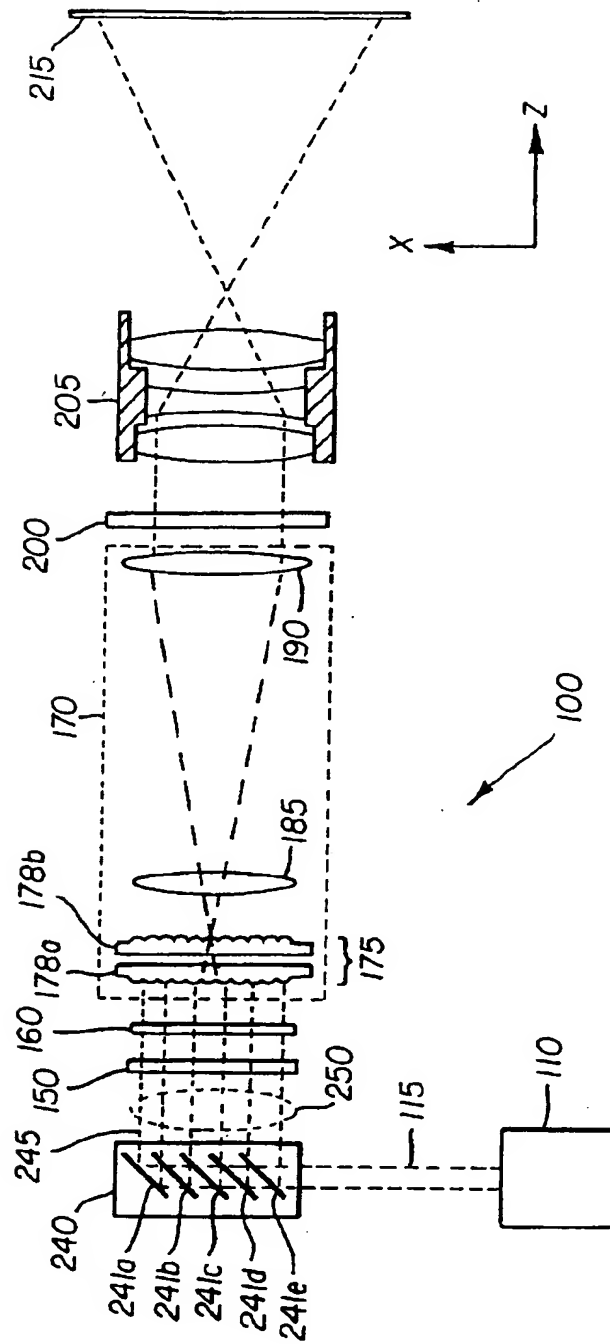


FIG. 8

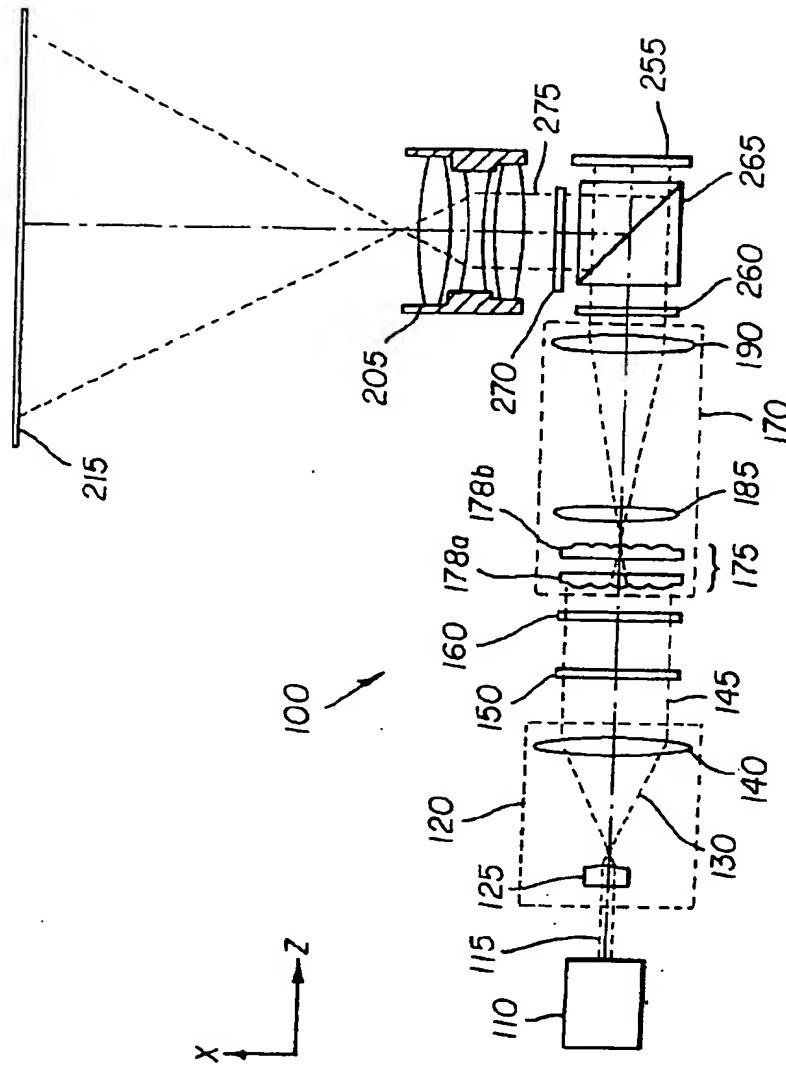
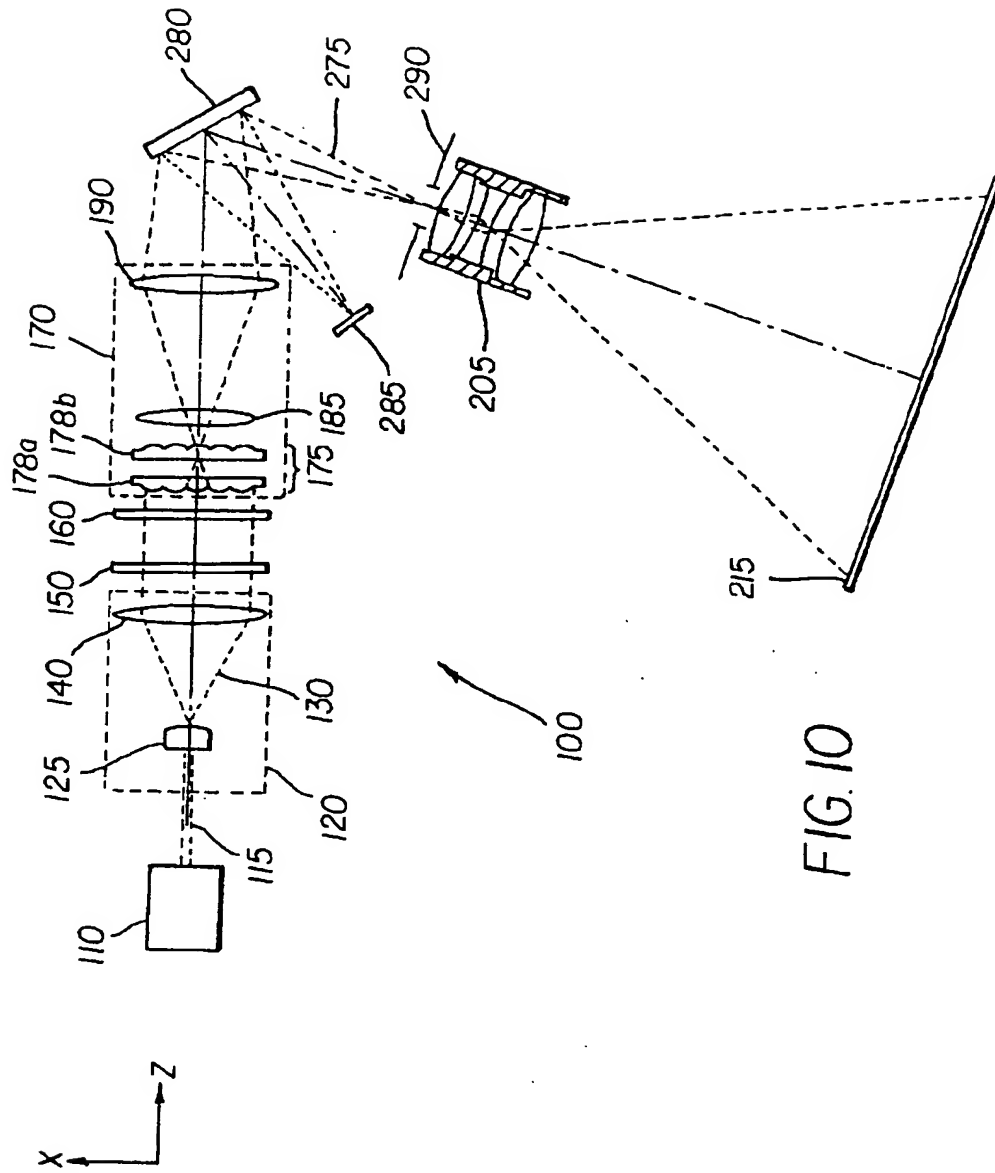


FIG. 9



**ABSTRACT OF THE DISCLOSURE**

A display apparatus includes a laser light source for emitting a light beam having a coherence length; a beam expander for expanding the light beam; a spatial light modulator; beam shaping optics for shaping the expanded laser beam  
5 to provide uniform illumination of the spatial light modulator, the beam shaping optics including a fly's eye integrator having an array of lenslets; a diffuser located in the light beam between the laser light source and the beam shaping optics; an electrically controllable de-speckling modulator for modifying the temporal and spatial phase of the light beam; and a projection lens for producing  
10 an image of the spatial light modulator on a distant screen.